

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

ZAVRŠNI RAD

Dino Bogdanić

Zagreb, 2015

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

ZAVRŠNI RAD

Ime i prezime: *Dino Bogdanić*

Voditelj rada: izv.prof. dr. sc. *Darko Landek*

Zagreb, 2014/2015



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dino Bogdanić**

Mat. br.: 0035189241

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdih prevlaka
proizvedenih PACVD postupkom**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Abrasion wear testing of hard coatings produced by PACVD process

Opis zadatka:

Postupkom plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (PACVD) proizvode se površinski slojevi specifičnih svojstava na konstrukcijskim dijelovima i alatima. Prema dostupnoj literaturi i izvorima informacija u radu treba opisati provedbu postupka PACVD i međusobno usporediti mehanička i tribološka svojstva tvrdih prevlaka TiN, TiN/TiCN i TiN/TiBN dobivenih ovim postupkom.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „pijesak/gumeni kotač“ na dva alatna čelika za hladni rad u polaznom stanju (bez prevlake) te nakon prevlačenja višeslojnim prevlakama TiN/TiCN i TiN/TiBN. Mjerenjem gubitka mase i analizom istrošenih površina svjetlosnom mikroskopijom, usporediti otpornost na abrazijsko trošenje ispitanih tvrdih prevlaka u odnosu na neprevučene površine.

Na osnovi rezultata ispitivanja procijeniti utjecaj tvrdih prevlaka, na alatnim čelicima za hladni rad, na povišenje otpornosti na abrazijsko trošenje i predložiti prevlake prikladne za ispitivane čelike.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

2. rok: 17. rujna 2015.

Predvideni datumi obrane:

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Izv.prof. dr.sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sažetak:

U radu je opisan postupak PACVD (*Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition*) i mogućnosti povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje alatnih čelika za hladni rad primjenom PACVD prevlaka TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N. Kao podloga za PACVD prevlake primijenjeni su visokolegirani alatni čelici za hladni rad X155CrVMo12-1 (Böhler K110) Böhler K390 MC. Opisan je cjeloviti postupak ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „pijesak-gumeni kotač“. Površine istrošenih uzoraka su analizirane primjenom svjetlosne stereomikroskopije i skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Ispitivanja su pokazala četiri do pet puta višu otpornost na abrazijsko trošenje svih ispitanih PACVD slojeva u odnosu na neprevučene uzorke.

Ključne riječi: PACVD, abrazijsko trošenje, TiN, TiCN, Ti-B-N.

Abstract:

In this work PACVD (*Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition*) procedure is described, as well as the possibilities of improving resistance to abrasive wear of cold work tool steels by application of PACVD coatings TiN/TiCN and TiN/Ti-B-N. As the base for PACVD coatings, high-alloyed tool steels for cold work X155CrVMo12-1 (Böhler K110) Böhler K390 MC are applied. The entire procedure of examining resistance to abrasive wear via „sand-rubber wheel“ method are described as well. The surfaces of worn samples are analyzed using a stereo microscope and a scanning electron microscope (SEM). Tests showed four to five times higher resistance to abrasive wear of all tested PACVD layers in relation to non-coated samples.

Keywords: PACVD, abrasive wear, TiN, TiCN, Ti-B-N.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	V
IZJAVA.....	VI
1. UVOD.....	1
TEORIJSKI DIO	2
2. POSTUPCI CVD I PACVD.....	3
2.1. Prevlačenje kemijskim taloženjem iz parne faze	3
2.2. PACVD postupak	8
3. ALATNI ČELICI ZA HLADNI RAD.....	11
3.1 Alatni čelik K110.....	11
3.2. Alatni čelik K390PM	14
4. METODA “PIJESAK/GUMENI KOTAČ”	17
4.1. Mehanizam trošenja abrazijom	17
4.2. Ispitivanje otpornosti na abraziju	20
4.2.1. Metoda “suhi pijesak/gumeni kotač”	23
EKSPERIMENTALNI DIO	26
5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA	27
5.1. Plan ispitivanja	27
5.2. Provedba ispitivanja.....	29
6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA.....	33
6.1. Ispitivanje otpornosti na abraziju	33
6.2. Analiza trošenih površina.....	37

7. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40
PRILOZI.....	41

POPIS SLIKA

Slika 2.1. <i>Prevučena i neprevučena oštrica reznog noža [1]</i>	3
Slika 2.2. <i>Višeslojna $TiN/Al_2O_3/TiCN$ prevlaka proizvedena CVD postupkom [1]</i>	4
Slika 2.3. <i>Faze stvaranja sloja u CVD postupku prevlačenja [1]</i>	5
Slika 2.4. <i>Shema CVD uređaja za prevlačenje prevlakma na osnovi titana [1]</i>	6
Slika 2.5. <i>Shematski prikaz PACVD uređaja [1]</i>	9
Slika 2.6. <i>Procesi na površini za vrijeme PACVD prevlačenja [6]</i>	10
Slika 3.2. <i>Dijagram popuštanja čelika X155CrVMo12-1 [8]</i>	13
Slika 3.3. <i>Cjelokupni proces toplinske obrade čelika X155CrVMo12-1 [8]</i>	13
Slika 3.4. <i>Tijek proizvodnje dijelova metalurgijom praha [10]</i>	14
Slika 3.5. <i>Razlika u iznosima udarne radnje loma i trošenja za različite načine proizvodnje čelika [11]</i>	15
Slika 3.6. <i>Usporedba čelika izrađenih: a) konvencionalnom tehnologijom i b) tehnologijom praškaste metalurgije [11]</i>	15
Slika 3.7. <i>TTT-dijagram K390PM čelika [12]</i>	16
Slika 4.1. <i>Jedinični događaji abrazijskog trošenja [13]</i>	17
Slika 4.2. <i>Abrazija u slučaju dodira dvaju ili triju tijela [13]</i>	18
Slika 4.3. <i>Slučajevi abrazije prema međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine: a) mikrobrazdanje, b) mikrorezanje, c) mikropukotine, d) mikroumor [13]</i>	18
Slika 4.4. <i>Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [13]</i>	19
Slika 4.5. <i>Tipični primjeri trošenih površina [13]</i>	19
Slika 4.6. <i>Metoda “suhi pijesak/gumeni kotač” [13]</i>	20
Slika 4.7. <i>Metoda “Taber abrazije” [13]</i>	20
Slika 4.8. <i>Metoda trošenja kuglicom [13]</i>	21
Slika 4.9. <i>Metoda sa slobodnom kuglicom [13]</i>	21
Slika 4.10. <i>Metoda s učvršćenom kuglom [13]</i>	21
Slika 4.11. <i>Shematski prikaz “suhi pijesak/gumeni kotač” uređaja [14]</i>	23
Slika 5.1. <i>Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka za ispitivanje otpornosti na abraziju [15]</i>	27
Slika 5.2. <i>Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od K110 i K390 Čelika: a) dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K390 čelika, dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K110 čelika, PACVD proces prevlačenja za nastanak duplex $TiN/TiCN$ prevlake, PACVD proces prevlačenja za nastanak višeslojne $TiN/Ti-B-N$ prevlake [15]</i>	28
Slika 5.3. <i>Ultrazvučna kupka</i>	29

Slika 5.4. Uređaj za ispitivanje metodom “suhi pijesak/gumeni kotač” [13]	30
Slika 5.5. Detalj uređaja: kotač, gumena traka, mlaznica, pijesak, držač uzorka [13]	30
Slika 5.6. Zaobljeni kvarcni pijesak [13]	31
Slika 5.7 Vaga "Mettler" Zurich (Laboratorij za tribologiju FSB-a).....	32
Slika 6.1. Gubitak mase u odnosu na put trošenja za ispitne uzorke iz skupine K110 čelika .	34
Slika 6.2. Gubitak mase u odnosu na put trošenja za ispitne uzorke iz skupine K390 čelika .	34
Slika 6.3. Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine D	35
Slika 6.4. Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine C	36
Slika 6.5. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika K110: Nprevučeni uzorak (D0), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (D2), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (D3)	37
Slika 6.6. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka iz skupine C: Nprevučeni uzorak (C0), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (C2), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (C3)	37
Slika 6.5. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika K110: Nprevučeni uzorak (D0), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (D2), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (D3)	38
Slika 6.8. SEM slike trošenih površina ispitnih uzoraka izrađenih od K390 čelika: Nprevučeni uzorak (C0), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (C2), Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (C3)	38

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. <i>Kemijski sastav X155CrVMo12-1 čelika</i> [8]	11
Tablica 3.2. <i>Kemijski sastav K390PM čelika</i> [12]	16
Tablica 3.3. <i>Usporedba osnovnih svojstava K110 i K390 čelika</i> [12]	16
Tablica 4.1. <i>Normirani uvjeti za metodu ispitivanja otpornosti na abraziju „suhi pijesak/gumeni kotač“</i> [13]	24
Tablica 4.2. <i>Uobičajene vrijednosti tvrdoće i gubitka volumena kod metode „suhi pijesak/gumeni kotač“</i> [14]	25

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno uz stručnu pomoć mentora izv.prof. dr. sc. Darka Landeka te uz korištenje navedene literature i rezultata dobivenih ispitivanjem.

Ovim putem zahvaljujem svima koji su mi pomogli u izradi završnog rada, a posebno mentoru izv.prof. dr.sc. Darku Landeku doc.dr.sc. Suzani Jakovljević te kolegi Jurici Jačanu za pruženu stručnu pomoć te svojoj obitelji za podršku pruženu tijekom studiranja.

1. UVOD

Tvrde prevlake otporne na trošenje su već dugi niz godina od izuzetne važnosti za industriju. Njihovom primjenom ostvaruje se značajno povećanje otpornosti na trošenje i koroziju te na naljepljivanje odvojenih čestica na alat, što značajno doprinosi produljenju uporabnog vijeka alata... Stoga se kvalitetno provedenim postupkom prevlačenja mogu ostvariti značajne uštede na alatnom materijalu, skraćenju tehnološkog procesa obrade odvajanjem čestica ili deformiranjem i sniženje troškova izrade i održavanja alata.

Za nanošenje triboloških prevlaka na alate od tvrdog metala i keramike već se više od 50 godina primjenjuje klasični postupak kemijskog prevlačenja iz parne faze (*engl. Chemical Vapor Deposition, CVD postupak*) na temperaturama između 800 do 1000 °C. Za nanošenje prevlaka na alatnim čelicima uobičajeno se primjenjuje postupak fizikalnog prevlačenja iz parne faze (*eng. Physical Vapour Deposition, PVD postupak*) na temperaturama nižim od 600 °C. Oba postupka imaju niz prednosti, ali i ograničenja u primjeni na alatne čelike. Postupak CVD provodi se na temperaturama koje su previsoke za većinu alatnih čelika te se oni nakon CVD prevlačenja trebaju ponovno kaliti i popuštati. PVD postupak zahtijeva direktnu vidljivost površine obratka za prevlačenje i izvora materijala prevlake, koju nije moguće ili je vrlo teško postići za većinu alata. Stoga je jedan od pravaca razvoja klasičnih CVD i PVD postupak usmjeren izvođenju prevlačenja na nižim temperaturama, u rasponu od 450 do 650 °C, a da se pritom ne izgube njihove prednosti. Upravo to je ostvareno razvojem postupka plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenje iz parne faze (*engl. Plasma-assisted CVD, PACVD postupak*). U postupku PACVD se ioniziraju i aktiviraju plinovi i pare oko šarže obradaka (substrata), odnosno nastaje kemijski aktivna plazma koja omogućuje nanošenje prevlake na značajno nižim temperaturama u odnosu na klasični CVD postupak.

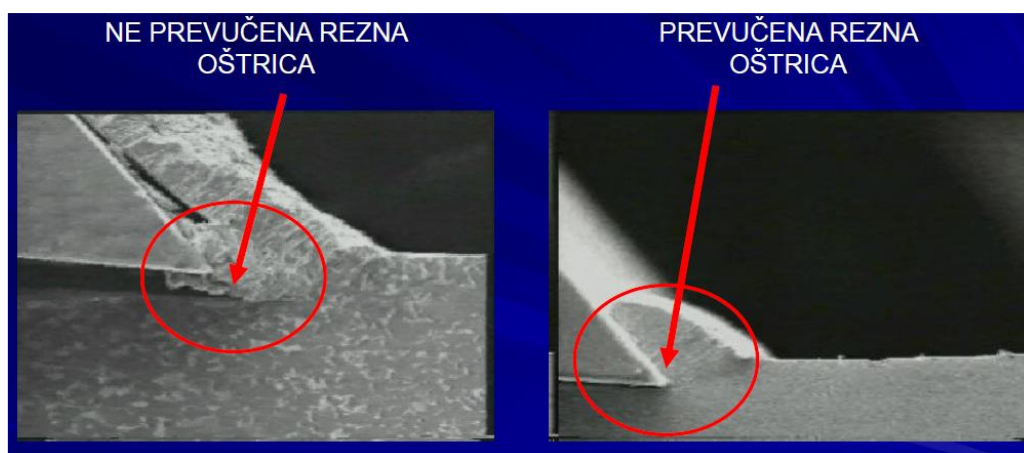
Abrazijsko trošenje je jedan od najzastupljenijih mehanizama trošenja i stoga je njegovo smanjivanje trajni cilj razvoja tvrdih, tzv. triboloških prevlaka. U radu se istražuje otpornost na abrazijsko trošenje višeslojnih prevlaka TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N nanešenih na alatne čelike za hladni rad.

TEORIJSKI DIO

2. POSTUPCI CVD I PACVD

2.1. Prevlačenje kemijskim taloženjem iz parne faze

CVD postupkom se mogu postići tanke prevlake metala, nemetala (npr. DLC, BC slojevi) ili kristala kemijskih spojeva kao što su: boridi, karbidi, nitridi i oksidi. CVD prevlačenje posebno je prošireno na ona područja primjene gdje su već osnovni najkvalitetniji materijali dostigli svoja granična svojstva, što je naročito slučaj kod prevlačenja alata za odvajanje čestica od tvrdog metala i keramike te kod alata za oblikovanje od visokolegiranih alatnih čelika koji se mogu prevlačiti na visokim temperaturama iznad 800°C. CVD prevlačenje tvrdim prevlakama smanjuje trošenje sniženjem adhezije i abrazije. Smanjene adhezijskog trošenja utječe na sniženje trenja i opasnosti od hladnog navarivanja koji kod obrade čelika s neprevučeni alatima mogu predstavljati veliki problem (slika 2.1). Time se u odnosu na neprevučene alate omogućuje bolja trajnost ili uz jednaku trajnost veće moguće opterećenje alata (npr. viša brzina rezanja ili viši stupanj deformacije kod oblikovanja).



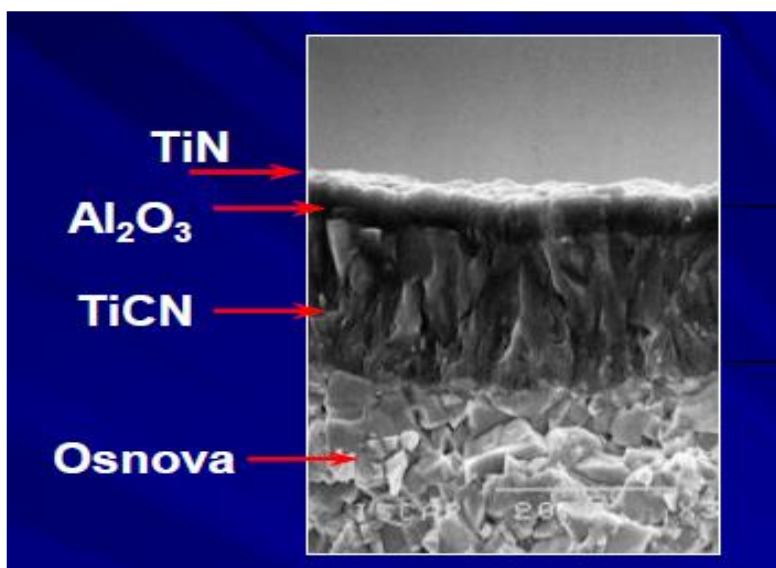
Slika 2.1. Prevučena i neprevučena oštrica reznog noža [1]

Teorijski je moguće prevlačenje svih čelika. Preniski udjeli ugljika čeliku smanjuju brzinu rasta slojeva. Uz visoki udjel slobodnog ugljika, tj. ugljika koji nije vezan u karbidima, dolazi za vrijeme rasta sloja do difuzije ugljika u sloj pa u površinskoj zoni podloge dolazi do izvjesnog razugljičenja. To se može negativno odraziti na svojstva obratka. Vrlo su prikladni svi visokolegirani alatni čelici – uz brzorezne čelike i čelici za hladni rad. Nadalje dobro se mogu prevlačiti tvrdi metali i cermeti (metalno-keramički kompoziti). U prevlačenju legura na osnovi neželjeznih metala do sada ima malo iskustva. Al legure nisu prikladne zbog preniskog tališta, a Ti legure radi nepostojanosti prema prekursorima koji sadrže halogene elemente [2].

Nakon CVD obrade slijedi hlađenje u peći, a tako postiziva intenzivnost hlađenja nije dovoljna da se visokolegirani čelici, inače kaljivi na zraku, prevedu u optimalnu strukturu kaljenja. Osim toga, često temperatura prevlačenja nije usklađena s optimalnom temperaturom austenitizacije. Za kaljive čelike mora se zbog toga nakon CVD prevlačenja izvesti toplinska obrada kaljenja i popuštanja. To ima dvije posljedice: toplinska obrada treba biti provedena u vakuumu zbog osjetljivosti na oksidaciju karbidnih i nitridnih tvrdih faza i načelno, zbog toga što kod svake toplinske obrade nastupa određena promjena mjera koja se ne može izbjeći. Od slučaja do slučaja treba zato ispitati jesu li održive pogonske proizvodne tolerancije nakon prevlačenja i naknadne toplinske obrade.

Za tribološke svrhe u primjeni se danas pojavljuju pretežno karbidi i nitridi četvrte do šeste podskupine periodnog sustava elemenata. Od najveće je važnosti pri tome titan-nitrid (TiN), titan-karbid (TiC), kao i ternarni spoj titan-karbonitrid (Ti[C, N]). Nadalje su poznati spojevi od cirkonij-nitrída (ZrN), hafnij-nitrída (HfN), vanadij-karbida (VC) i također volfram-karbida (W_2C) i nekih drugih spojeva iz te skupine. [3] U izradi alata uobičajeno je CVD prevlačenje prevlakama TiN ili sličnim tvrdim spojevima značajno se poboljšava otpornost na adheziju i abraziju. Ostala svojstva površinskog sloja ostaju očuvana, npr. maksimalni dopušteni površinski pritisak, dinamička izdržljivost i savojna čvrstoća. Otpornost na koroziju ne daje jednoznačnu sliku. S jedne strane tvrde su prevlake (kao npr. TiN) kemijski otpornije nego čelik, ali svakako zbog napuklina u sloju može doći do stvaranja lokalnog galvanskog članka. Posljedica je vrlo brzo stvaranje rupica u manje plemenitom osnovnom materijalu. Najveća temperatura primjene prevlaka TiN iznosi $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ jer iznad te temperature dolazi vrlo brzo do oksidacije prevlake..

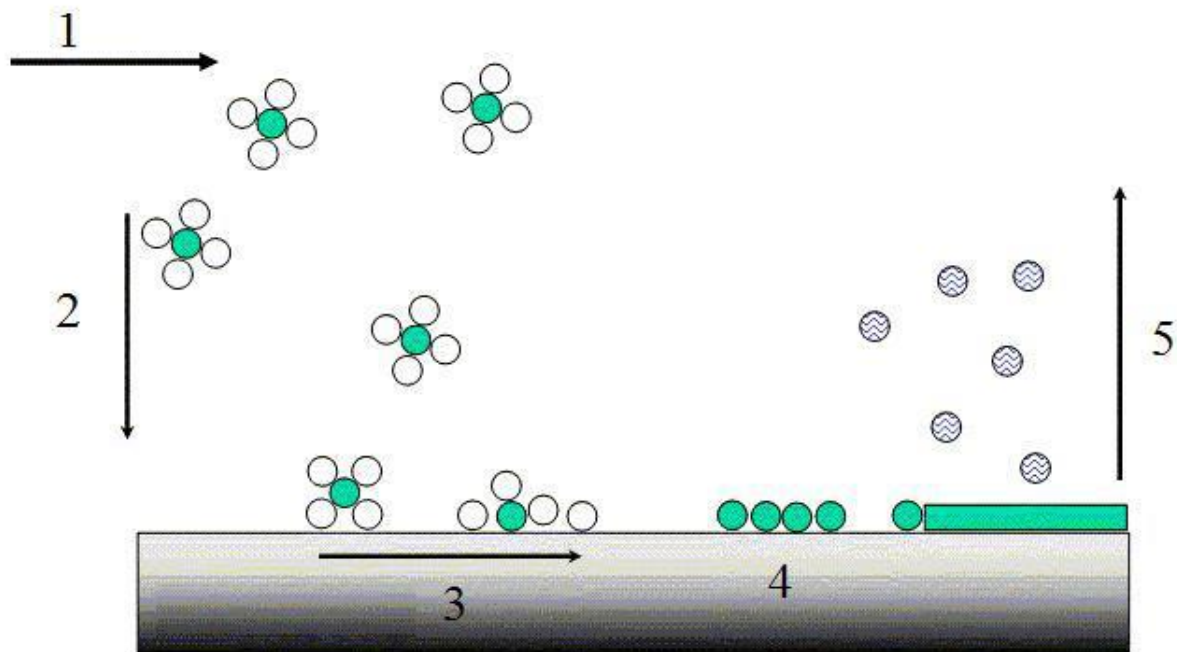
Daljnji tip sloja je aluminij-oksíd (Al_2O_3) koji se ne pojavljuje kao pojedinačni sloj, nego većinom zajedno s ostalim vrstama tvrdih spojeva i to u višeslojnim prevlakama. Također je uobičajeno nanošenje višeslojnih CVD prevlaka. Na slici 2.2 prikazan je primjer mikrostrukture višeslojne prevlake $TiN/Al_2O_3/TiCN$.



Slika 2.2. Višeslojna $TiN/Al_2O_3/TiCN$ prevlaka proizvedena CVD postupkom [1]

Proces stvaranja prevlake CVD postupkom se može podijeliti na pet tipičnih faza (slika 2.3):

1. Ubacivanje reaktanata u retortu (vakuumsku komoru).
2. Difuzija reaktanata kroz granični sloj do površine predmeta.
3. Adsorpcija reaktanata na površinu.
4. Reakcija na površini: nastanak otoka ili klastera.
5. Difuzija produkata koji ne sudjeluju u nastanku sloja od površine predmeta.

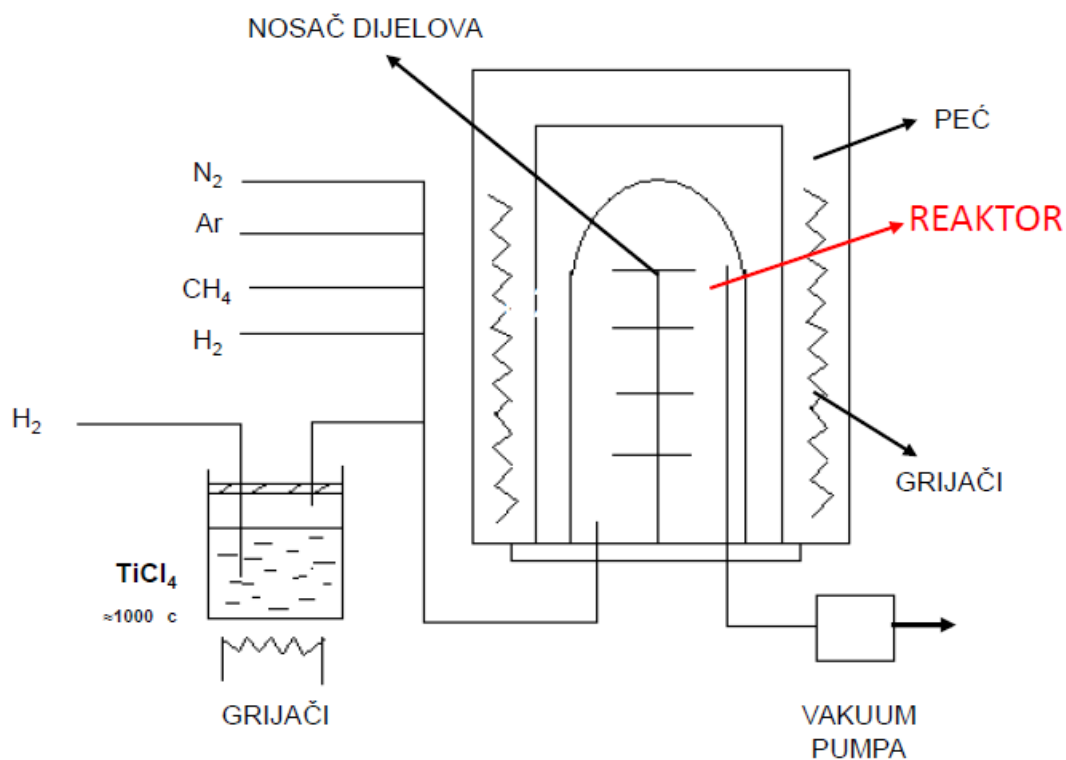


Slika 2.3. Faze stvaranja sloja u CVD postupku prevlačenja [1]

Predobrada dijelova koje treba prevući sastoji se od temeljitog čišćenja pri čemu se otklanjaju slobodne čestice i ostaci masti. Nakon stavljanja u komoru, komora se evakuira i tada se u reducirajućoj atmosferi ugrije na optimalnu temperaturu obrade između 900 °C i 1000 °C kako bi se površina osnovnog materijala depasivirala. Ugrijavanje se ostvaruje vanjskim grijačima (reaktor s toplim stijenkama) ili direktnim grijanjem obradaka unutar reaktorskog prostora (reaktor s hladnim stijenkama). Pri tome je jednolična raspodjela temperature u cijeloj šarži važna pretpostavka za jednolični rast sloja. Na slici 2.4 prikazana je shema CVD uređaja s toplom stijenkom peći za proizvodnju prevlaka na osnovi titana.

Kada se dostigne temperatura obrade, prespoji se dovod plina na dovod reaktivnih plinova (prekursora) iz kojih će kemijskim reakcijama nastati materijal prevlake. Za prevlake na osnovi titana kao prekursor se uobičajeno koristi TiCl_4 , a za taloženje oksidne keramike Al_2O_3 primijenjuje se prekursor aluminijev triklorid. Kao plin nosač za nemetalne komponente primijenjuju se čisti plinovi: N_2 , CH_4 i CO_2 . Sve polazne supstance su plinovite (npr. TiCl_4 mora ispariti, a AlCl_3 sublimirati) i potom se ubacuju u vakuumsku komoru – reaktor. U njoj na temperaturama između $900\text{ }^\circ\text{C}$ do $1000\text{ }^\circ\text{C}$ nastaje niz kemijskih reakcija u kojima kao industrijski koristan produkt nastaje prevlaka na površini šarže.

Brzina rasta sloja iznosi do nekoliko $\mu\text{m/h}$, ovisno o temperaturi i parcijalnim tlakovima reakcijskih plinova i para prekursora. Za vrijeme rasta sloja također dolazi do pojačane međudifuzije između osnovnog materijala i sloja. To ukupno rezultira izvrsnom prionljivošću slojeva. Nakon isteka vremena prevlačenja isključuje se ugrijavanje, odnosno odstranjuje se retorta peći, a vakumska komora (reaktor) se hladi strujom inertnog plina.



Slika 2.4. Shema CVD uređaja za prevlačenje prevlakma na osnovi titana [1]

Reakcijski plinovi i nusprodukti kemijskih reakcija kontinuirano se isisavaju vakuumskom pumpom, pri čemu se tlak u vakumskoj komori održava između nekoliko desetina milibara do atmosferskog tlaka. Kao nusprodukt stvaranja prevlaka na osnovi titana nastaje klorovodična kiselina HCl. Svi dijelovi uređaja koji dolaze u doticaj s parama HCl izrađeni su od korozijski postojanog materijala. Neutralizacija plinova i para iz CVD postupka provodi se u pumpama za tekućine koje se pogone nekim alkalnim medijima, npr. natrijevom lužinom (NaOH). Kao krajnji produkt neutralizacije nusprodukata CVD postupka nastaje talog soli NaCl i plinoviti CO₂.

Brzo i relativno jednostavno izvedivo ispitivanje CVD prevučenih dijelova obuhvaća nekoliko točaka. Vizualnim pregledom – najbolje pod stereomikroskopom – postaju vidljivi lokaliteti na kojima je došlo do odlupljivanja ili neprevučena mjesta. Nejednolično bojenje prevlake na obratku znači različite debljine ili različite sastave prevlaka. Razlike u boji između uzoraka koji su bili postavljeni na različite pozicije u prostoru za šaržiranje ukazuju na temperaturne razlike u reakcijskom prostoru. Daljnja ispitivanja zahtijevaju lako pristupačnu i dovoljno ravnu plohu. Tako se ispitivanje površinske hrapavosti izvodi na posebnom uređaju s ticalom. Utvrđivanje debljine prevlake izvodi se na kalotnom izbrusku. Za ispitivanje prionjivosti prevlake primijenjuje se test brazdanjem (*engl. scratch test*).

Površinska hrapavost dijelova prije prevlačenja trebala bi biti toliko dobra koliko je nužno za primjenu. Uslijed CVD prevlačenja dolazi do izvjesnog pogoršanja hrapavosti, što će se od slučaja do slučaja moći korigirati naknadnim poliranjem. Svakako treba znati da će neizbježno odnošenje sloja kod poliranja biti neznatno u odnosu prema ukupnoj debljini sloja.

2.2. PACVD postupak

Pojam PACVD označuje kraticu anglosaksonskog pojma “Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition” – kemijsko taloženje iz parne faze”.

Nedostaci postupka PVD i CVD tehnologija su doveli do povećanog zanimanja za PACVD postupak. Novi napredak u izradi vakuumskih peći i primjeni plazme u obradi materijala doveli omogućili su razvoj PACVD postupka za proizvodnju TiN i TiCN prevlaka na tvrdim metalima i čelicima na temperaturama između 480 do 560 °C. Jedan od industrijskih PACVD uređaja instaliran je Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB-u).

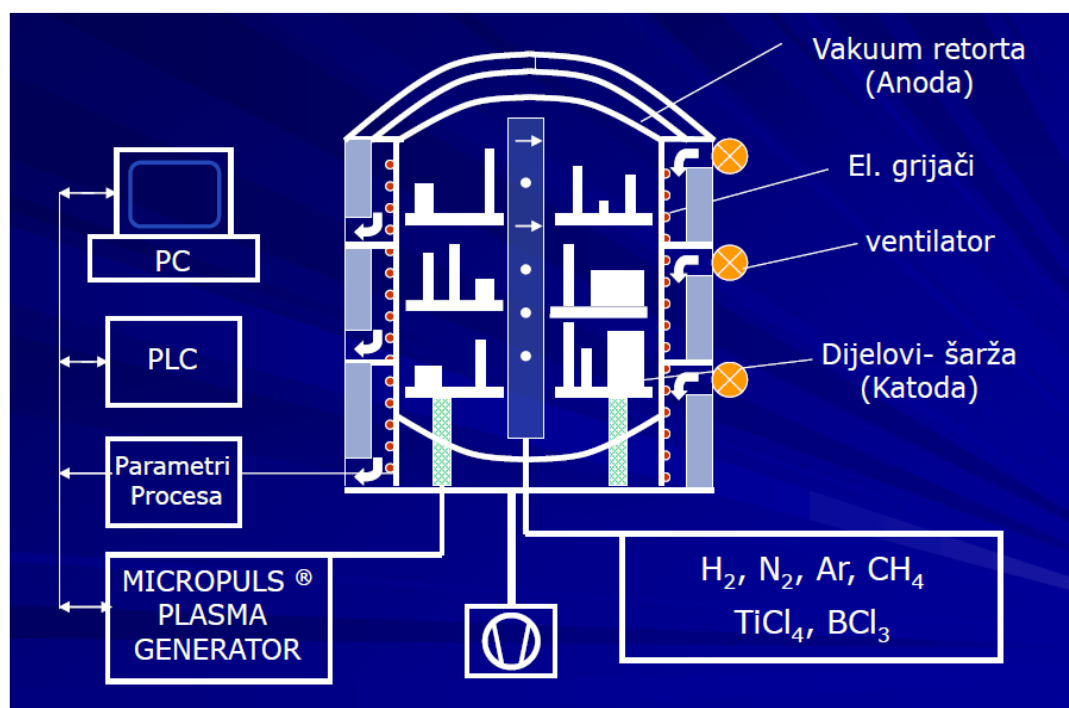
U samim počecima razvoja tehnologije postizala se vrlo dobra adhezivnost prevlake na tvrdim metalima, ali ne baš tako dobra adhezivnost na čelicima. Problem se eliminirao korištenjem optimalnih temperatura obrade (480...550 °C) i temeljitim čišćenje površine čelika. Kontakt površine substrata i prevlake se treba sastojati od najjačih mogućih veza i od apsolutne je važnosti da je površina substrata što čišća. Optimalna čistoća se postiže na način da se koristi prikladan proces čišćenja prije nego li se substrat postavi u reaktor, nakon čega slijedi kemijsko čišćenje plazmom u kombinaciji s fizičkim uklanjanjem nečistoća prskanjem teškim ionima. [4]

PACVD proces je sličan PVD postupku s obzirom na temperaturu primjene, a također ima veliku prednost CVD postupka koja uključuje mogućnost depozicije u vrlo malim rupicama obratka. Otpornost PACVD prevlaka na stvaranje naljepka je također pozitivno svojstvo u mnogo situacija, a vrlo je teško postizivo na bilo koji drugi način. Proces također ima potencijal za prevlačenje vrlo velikih predmeta ako se mogu riješiti problemi distribucije plina. Još jedna velika prednost postupka je ta da je veoma ekološki „friendly“, za razliku od drugih postupaka prevlačenja.

PACVD uređaj instaliran na FSB-u omogućuje proizvodnju vrlo tankih jednoslojnih, višeslojnih (čak i nanodimenzionalnih) slojeva kao što su: TiN, TiCN, Ti-B-N, TiB₂,... Osim toga, u tom uređaju se može provoditi najmoderniji postupak nitriranja u plazmi i to u integriranom procesu s nanošenjem završnog sloja. Značajne prednosti PACVD postupka jesu sljedeće [5]:

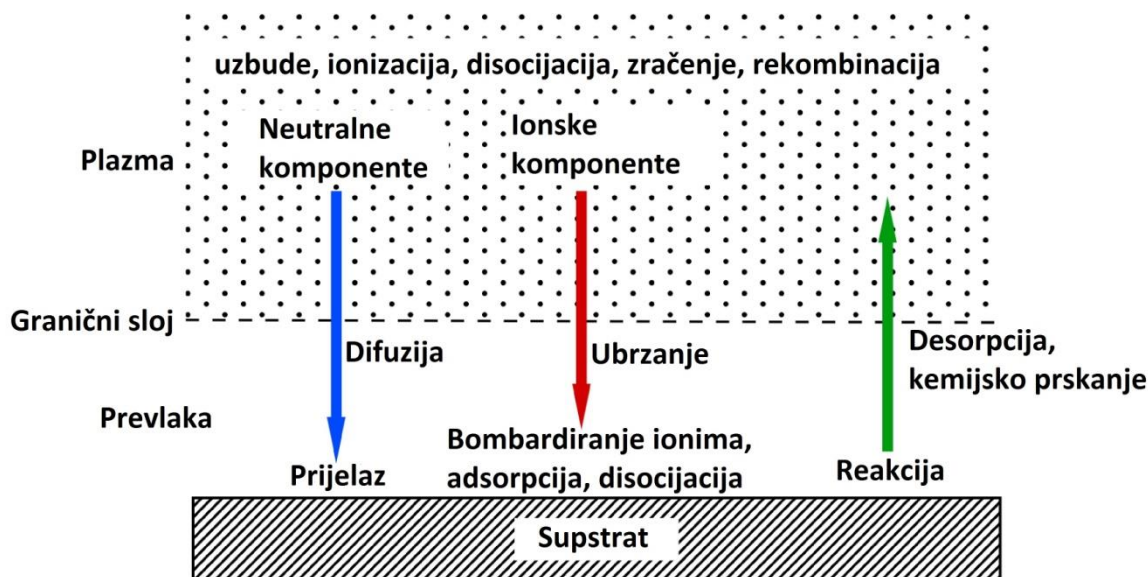
- nitriranje u plazmi + prevlačenje,
- nitriranje i prevlačenje (dupleks) moguće je provesti u jednom procesu – kontinuirano,
- niska temperatura procesa (ispod 500 °C),
- nema promjena dimenzija obratka,
- prikladnost za masivne predmete kompliciranog oblika,
- nema emisija štetnih tvari,
- ekonomičnost postupka,
- efekt samočišćenja površine,
- visoka pouzdanost (ponovljivost) procesa.

Shematski prikaz PACVD uređaja prikazan je na slici 2.5. Uređaj se sastoji od vakuumske komore s grijačima, vakuumske pumpe, sustava za dobavu plinova (N_2 , Ar, H_2 , CH_4) i prekursora ($TiCl_4$, BCl_3), generatora plazme, sustava za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja te PLC regulacijskog sustava. Dodavajući energiju plinu koji okružuje obratke, inertni i aktivni plinovi se ioniziraju i aktiviraju, odnosno stvorena je kemijski aktivirana plazma koja omogućuje prevlačenje bez dostizanja visokih temperatura koje su karakteristične za klasični CVD postupak. Razvijen je također još jedan karakterističan tip PACVD postupka koji se zove pulsirajući DC (direct current) plazma CVD postupak kod kojeg se veliki istosmjerni napon dijeli na kontrolirane pulsirajuće intervale i intervale pauze. Pulsirajući intervali stvaraju plazmu koja omogućuje prevlačenje. Nadalje, podešavanjem trajanja pulsirajućih intervala i intervala pauze moguće je koristiti dovoljno visok napon kako bi se dobila dobra svojstva prevlaka bez pregrijavanja substrata. Cijeli sustavom je vođen PLC (programabilni logički kontroler) uređajima i računalnim programskim sustavom Simens Simatic i upravljačkim programskim sustavom proizvođača PACVD uređaja.



Slika 2.5. Shematski prikaz PACVD uređaja [1]

Jedan od značajnih problema u PACVD tehnologiji je velika ovisnost postizivih svojstava prevlake o mješavini plina u reaktoru. Uzmimo za primjer da se neki visoki cilindar velikog promjera prevlači u reaktoru. Plin struji odozgo prema dolje. Problem leži u tome što je parcijalni tlak elementa koji se deponira niži na donjem dijelu nego na gornjem dijelu što rezultira lošijim prevlačenjem. Naravno, taj problem se može regulirati s dobrim izborom parametara poput toka plina i tlaka. Geometrije i pozicije plinskih usisa također imaju veliki utjecaj na homogenost prevlake. Dakle, optimalni uvjeti PACVD prevlačenja bi bili ostvareni ako su ostvareni isti parcijalni tlakovi bilo koje komponente u plinu na svakom mjestu u svakom trenutku.



Slika 2.6. *Procesi na površini za vrijeme PACVD prevlačenja [6]*

Današnje procjene ekonomskih aspekata pokazuju da je PACVD postupak potencijalno jeftinija tehnologija od PVD postupka, ali direktna usporedba koja se bazira na cijeni po prevučenom obratku nije moguća dok se PACVD postupak dodatno ne ustali u primjeni. Važno je naglasiti da obe tehnologije imaju svoje niz prednosti i mogućnosti koje ona druga ne može riješiti, te je stoga vrlo teško napraviti direktnu usporedbu ekonomičnosti.

3. ALATNI ČELICI ZA HLADNI RAD

U radu se kao podloga za nanošenje PACVD prevlaka primijenjuje uobičajeni visokolegirani alatni čelik za hladni rad X155CrVMo12-1 (W.Nr. 1.2379, Böhler K 110) i suvremeni visokolegirani alatni čelik Böhler K 390 PM proizveden praškastom metalurgijom.

3.1 Alatni čelik K110

K110 alatni čelik za hladni rad je visokouglični čelik s visokim udjelom kroma izvrsne dimenzijske postojanosti i prikladan za kaljenje na zraku. [7] Tablica 3.1. prikazuje normom propisan kemijski sastav čelika X155CrVMo12-1. Ovaj čelik nalazi uobičajenu primjenu za izradu:

- visokoopterećenih reznih alata,
- alata za obradu drva,
- alata za duboko vučenje, hladno provlačenje, hladno valjanje i kovanje.
- instrumenata za mjerenje,
- malih kalupa za polimernu industriju gdje se traži izvrsna otpornost na trošenje.

Tablica 3.1. *Kemijski sastav X155CrVMo12-1 čelika [8]*

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.55	0.30	0.30	11.30	0.75	0.75

Čelik X155CrVMo12-1 pokazuje u radu niz prednosti:

- izrazita čistoća zahvaljujući procesu vakuumskog otplinjavanja,
- dobra obradivost,
- visoka postiziva tvrdoća, uz pažljivo hlađenje na zraku može otvrdnuti bez pojave pukotina,
- vrlo male deformacije tijekom toplinske obrade zbog kojih je prikladan za precizne žigove, stance i kalupe,
- vrlo dobra otpornost na trošenje.

Posebnosti toplinske obrade čelika X155CrVMo12-1 sastoje se u potrebi za dvostrukim predgrijavanjem prije austenitizacije, mogućnosti sporijeg ohlađivanja u tehničkim plinovima ili na zraku, te niskotemperaturnom, odnosno srednetemperaturnom popuštanju.

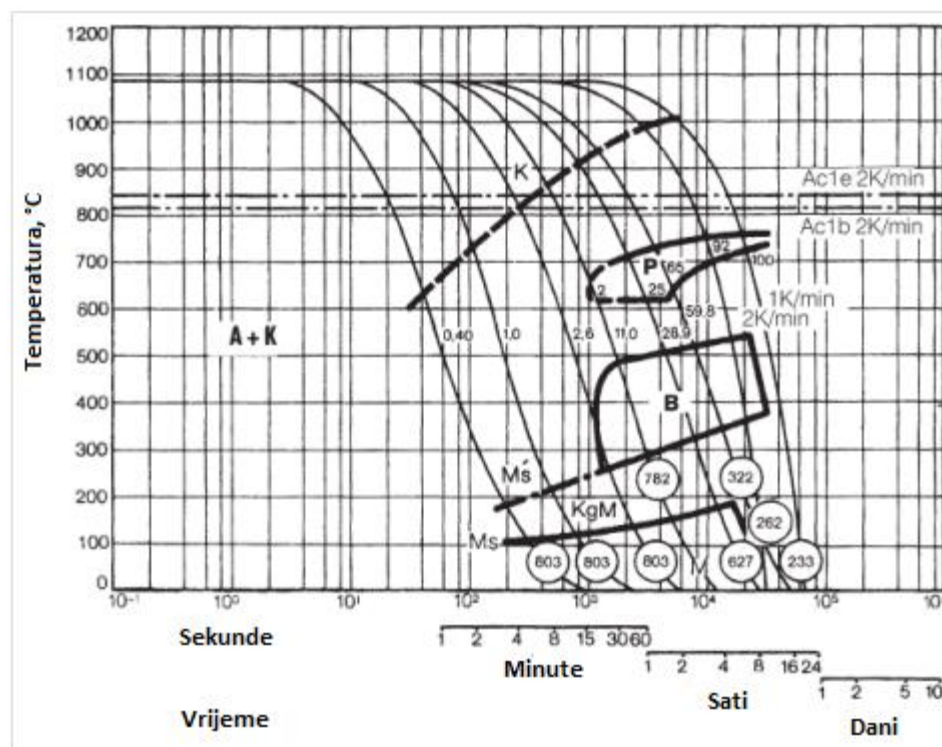
Karakteristike toplinske obrade ovog čelika su, sljedeće:

1) Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja:

- temperatura žarenja 650...700 °C,
- sporo hlađenje u peći,
- namjena za uklanjanje napetosti uzrokovanih pretjeranom obradom u kompliciranim oblicima,
- nakon temeljitog ugrijavanja držanje u neutralnoj atmosferi 1...2 sata.

1) Kaljenje:

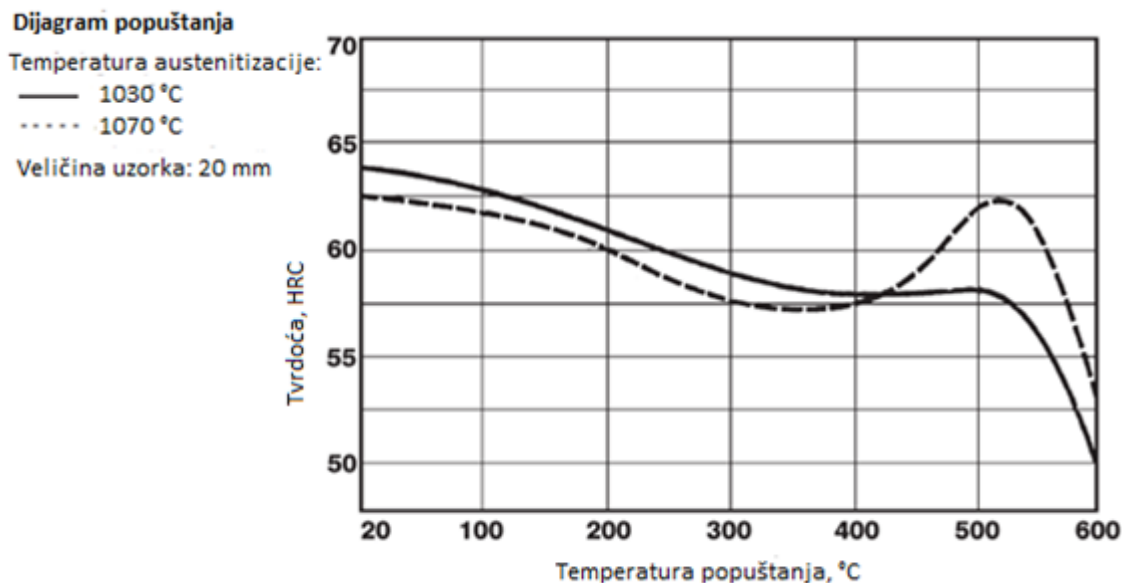
- temperatura austenitizacije 1020...1040 °C,
- držanje na temperaturi austenitizacije 15...30 minuta,
- jednostavniji oblici se hlade u ulju ili solnoj kupki (220...250 °C ili 500...550 °C),
- određivanje brzine gašenja prema kontinuiranom TTT dijagramu (slika 3.1)
- postiziva tvrdoća 58...61 HRC.



Slika 3.1. TTT-dijagram X155CrVMo12-1 [8]

3) Popuštanje:

- sporo ugrijavanje odmah nakon kaljenja 1 sat u peći za svakih 20 mm debljine, ali uz barem 2 sata hlađenja na zraku,
- za određene primjene koristiti nižu temperaturu popuštanja i povećati vrijeme držanja
- izbor temperature popuštanja prema dijagramu popuštanja na slici 3.2.



Slika 3.2. Dijagram popuštanja čelika *X155CrVMo12-1* [8]

Na slici 3.3 prikazan je dijagram postupka toplinske obrade prema gore navedenim preporukama.



Slika 3.3. Cjelokupni proces toplinske obrade čelika *X155CrVMo12-1* [8]

Svojstva površinskog sloja se mogu značajno poboljšati primjenom nitiranja. [9] Tvrdoća osnovnog materijala može iznositi čak do 60 HRC. Ako se želi ostaviti maksimalna dimenzijska stabilnost, temperatura popuštanja bi trebala biti barem jednaka temperaturi nitiranja. Nakon nitiranja je preporučeno napraviti žarenje za redukciju napetosti pri oko 300 °C. Dodano se otpornost na trošenje ovog čelika može povećati primjenom tvrdih prevlaka.

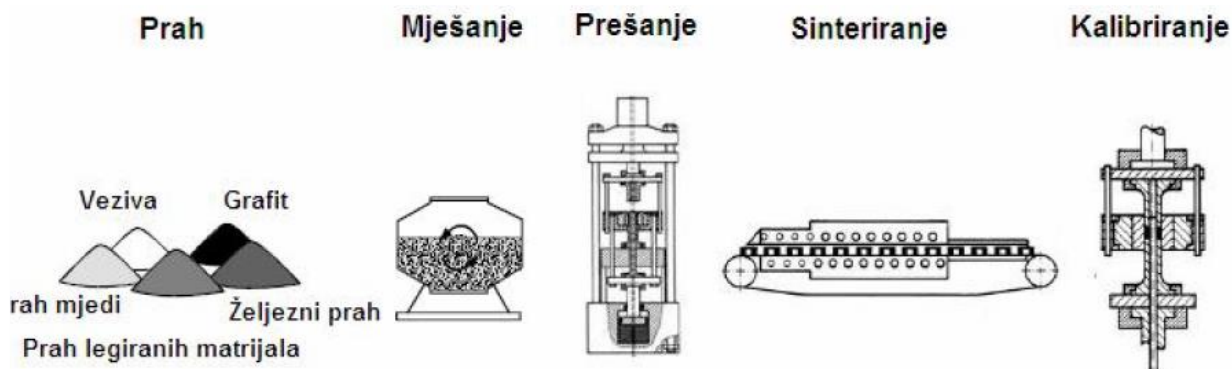
3.2. Alatni čelik K390PM

Alatni čelik za hladni rad K390 PM proizveden je tehnologijom praškaste metalurgije. Razvijen je kako bi zadovoljio razne zahtjeve od otpornosti na trošenje do tlačne čvrstoće, odnosno zahtjeve koje iziskuje primjena u npr. rezanju, hladno oblikovanju i sličnom. Životni vijek alata se može povećati nekoliko puta zahvaljujući visokoj otpornosti na trošenje i žilavosti. Takva svojstva osiguravaju povećanje efikasnosti proizvodnog procesa i posljedično smanjuju troškove po proizvedenom komadu.

Primjena praškaste metalurgije u odnosu na konvencionalne postupke i pretaljivanja pod troškom u vakuumu pokazuje niz prednosti, od koji se posebno ističu sljedeće:

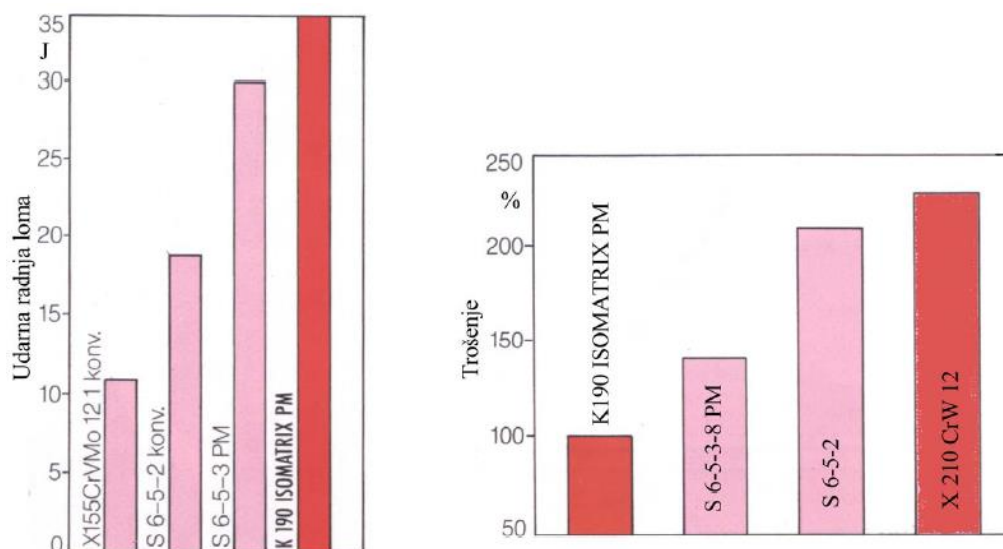
- bitno brže skrućivanje, nema segregacija, mali homogeno raspoređeni karbidi,
- potpuna izotropna svojstva,
- omogućen znatno viši udjel metalnih elemenata (karbidotvoraca) -> viša otpornost na trošenje (nemoguće drugačije proizvesti),
- poboljšana sposobnost brušenja, poliranja, obrada elektroerozijom te fotonagrizanje,
- manje, jednolične i ponovljive deformacije tijekom toplinske obrade,
- konstantna svojstva materijala duž cijelog presjeka i po cijeloj dužini neproblematične obrade,
- male deformacije tijekom toplinske obrade,
- otpornost na pregrijavanje ili predugo držanje na temperaturi austenitizacije.

Glavne faze procesa izrade poluproizvoda praškastom metalurgijom prikazane su na slici 3.4. On se sastoji od



Slika 3.4. *Tijek proizvodnje dijelova metalurgijom praha [10]*

Na slici 3.5. uspoređena je žilavost i otpornost na trošenje nekoliko visokolegiranih alatnih čelika sličnog kemijskog sastava proizvedenih klasičnom metalurgijom I praškastom metalurgijom. Iz prikaza se uočava prednost proizvodnje čelika praškastom metalurgijom.

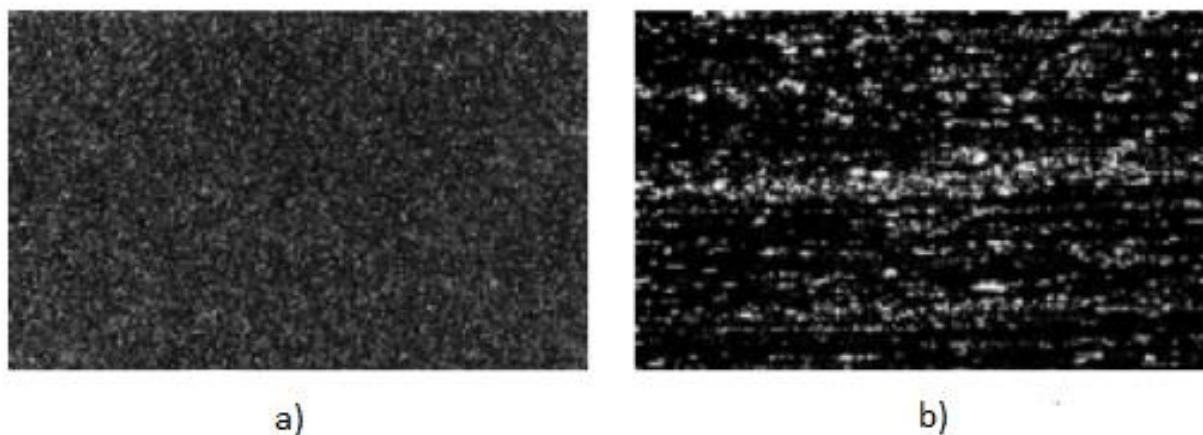


Slika 3.5. Razlika u iznosima udarne radnje loma i trošenja za različite načine proizvodnje čelika [11]

Navedena svojstva označavaju i dobar niz prednosti za korisnika alata koji je izrađen od čelika proizvedenog praškastom metalurgijom. Neke od tih prednosti jesu sljedeće:

- duži uporabni vijek alata.
- manja vjerojatnost da dođe do loma ili ljuštenja reznih oštrica.
- niža cijena alata.
- sniženje troška po komadu i povećanje kvalitete proizvedenih komada.

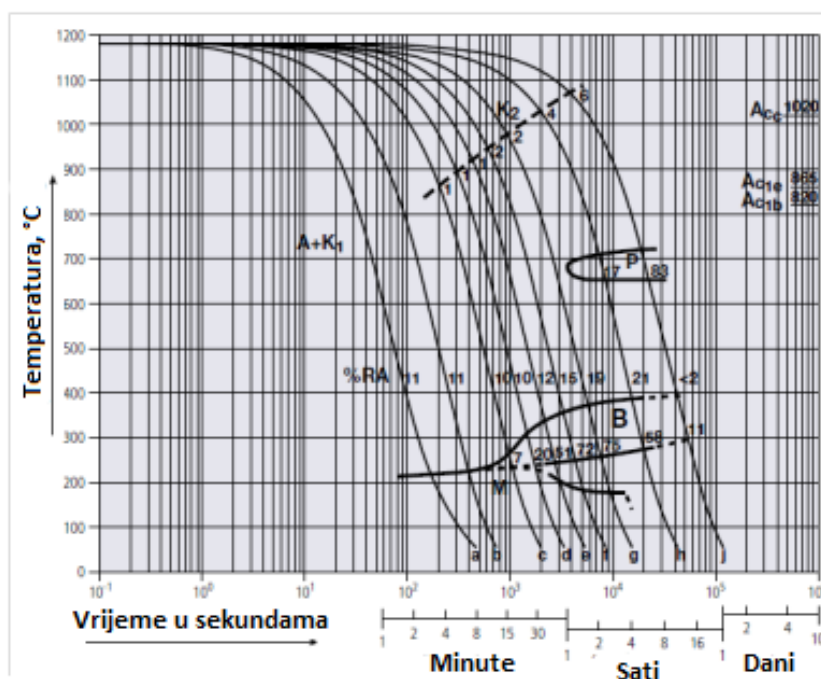
U pogledu mikrostrukture najvažnije je spomenuti kako su karbidi sitnozrnati, bez segregacija i vrlo ravnomjerno raspoređeni, (slika 3.3). Kemijski sastav je također jednoličan u čitavom volumenu materijala, pa su i svojstva također izuzetno izotropna.



Slika 3.6. Usporedba mikrostrukture čelika izrađenih: a) tehnologijom praškaste metalurgije i b) konvencionalnom tehnologijom [11]

Tablica 3.2. *Kemijski sastav K390PM čelika [12]*

Kemijski sastav (prosjek %)						
C	Si	Cr	Mo	V	W	Co
2,45	0,55	4,15	3,75	9,00	1,00	2,00

**Slika 3.7.** *TTT-dijagram K390PM čelika [12]*

Toplinska obrada čelika K390 PM uobičajeno se sastoji od žarenja za redukciju zaostalih naprezanja, kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja se vrši na temperaturi od 650...700 °C, potapa između 1 i 2 sata u neutralnoj atmosferi i polagano hladi u peći. Čelik K390PM nakon kaljenja može postići tvrdoću između 62 do 66 HRC. Temperatura austenitizacije iznosi od 1030...1180 °C, nakon ugrijavanja se na temperaturi austenitizacije drži 20 do 30 minuta. Ako se traži veća žilavost onda biramo niže temperature austenitizacije, a ako tražimo veću otpornost na trošenje onda biramo više temperature austenitizacije. Popuštanje se vrši u peći 1 sat (za obratke debljine do 20 mm) ili 2 sata te se hladi na zraku. Preporuča se da se popuštanje obavi barem 3 puta.

Tablica 3.3. *Usporedba osnovnih svojstava K110 i K390 čelika [12]*

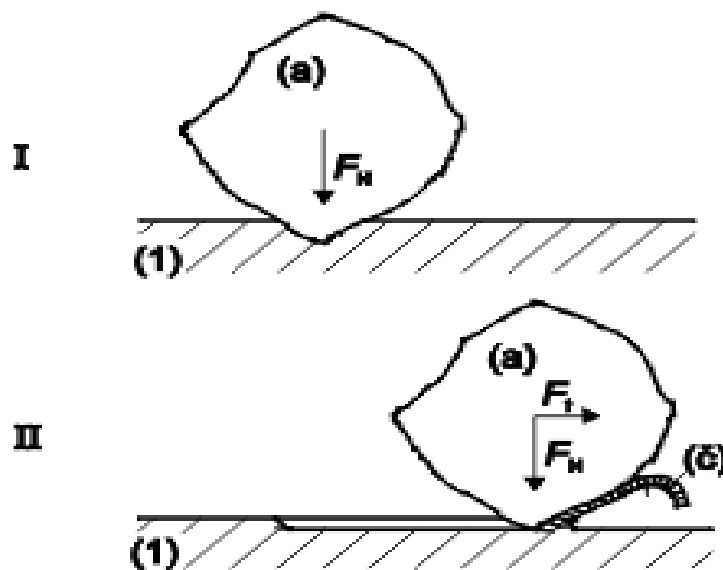
	Otpornost na trošenje abrazija	Otpornost na trošenje adhezija	Tvrdoća	Tlačna čvrstoća	Dimenzijska stabilnost tijekom toplinske obrade
BOHLER K110	***	**	*	**	**
BOHLER K390 MICROCLEAN	*****	*****	*****	*****	****

4. METODA “PIJESAK/GUMENI KOTAČ”

4.1. Mehanizam trošenja abrazijom

Abrazija je mehanizam trošenja kojeg karakterizira istiskivanje materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Više od 50 % slučajeva trošenja otpada na ovaj mehanizam, a ostatak otpada na adheziju, umor površine, tribokoroziju itd.

Mehanizam abrazijskog trošenja možemo još slikovitije opisati s dva jedinična događaja koja su prikazana na slici 4.1.



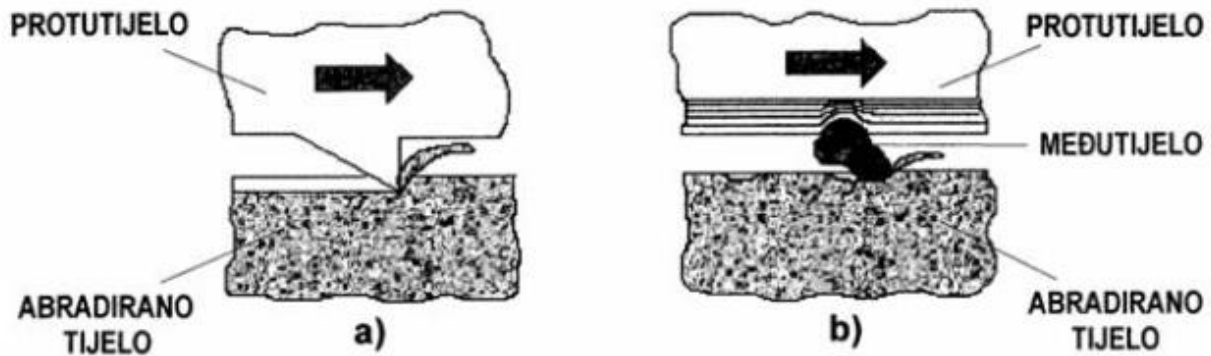
Slika 4.1. Jedinični događaji abrazijskog trošenja [13]

1. Faza – prodiranje abraziva u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N .
2. Faza – istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_N .

Mehanizam trošenja abrazijom je kompleksan proces kojeg možemo bolje razmatrati ako ga razdjelimo na više pojava oblika:

Podjela prema broju tijela u dodiru (slika 4.2):

- Abrazija u dodiru 2 tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo); javlja se npr. kod tokarenja, glodanja i brušenja.
- Abrazija u dodiru 3 tijela – tribosustav se sastoji od 2 funkcionalna dijela, te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

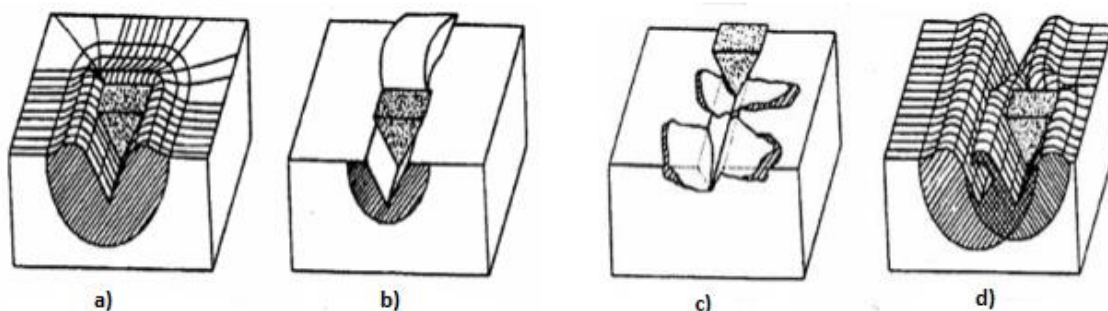


Slika 4.2. Abrazija u slučaju dodira dvaju ili triju tijela [13]

Odnosenje materijala u dodiru tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dvaju tijela. Razlog tome je što čestice abraziva samo oko 10 % vremena provode u odnošenju materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.

Podjela prema međusobnom djelovanju između abrazivskih čestica i trošene površine (slika 4.3):

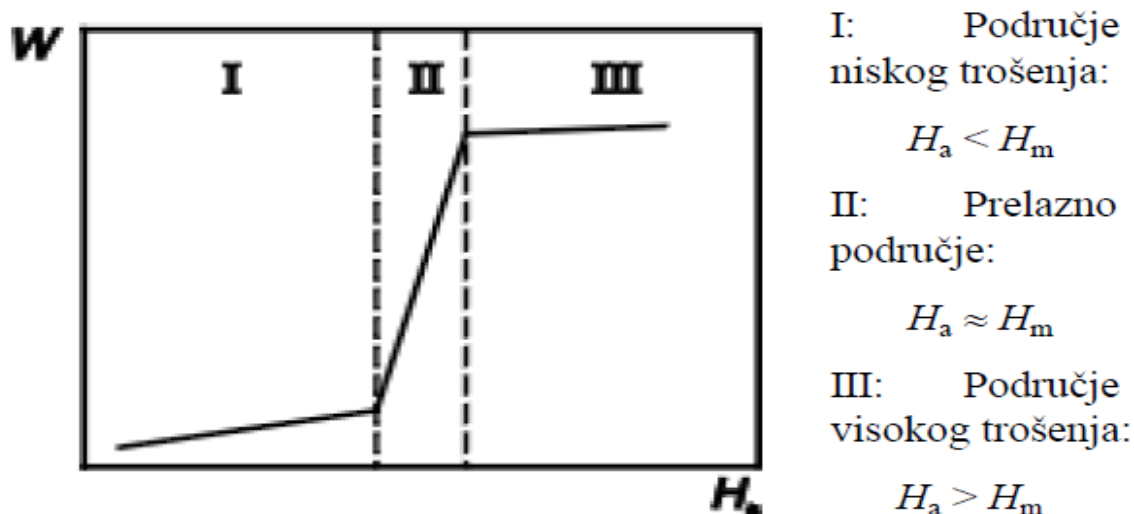
- Mikrobrazdanje – odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazivske čestice. Abrazivska čestica neće proizvesti produkte trošenja nego će materijal biti potisnut u stranu u obliku bočnih grebena.
- Mikrorezanje – odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice.
- Mikronaprnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja pukotina.
- Mikroumor – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine.



Slika 4.3. Slučajevi abrazije prema međusobnom djelovanju između abrazivskih čestica i trošene površine: a) mikrobrazdanje, b) mikrorezanje, c) mikropukotine, d) mikroumor [13]

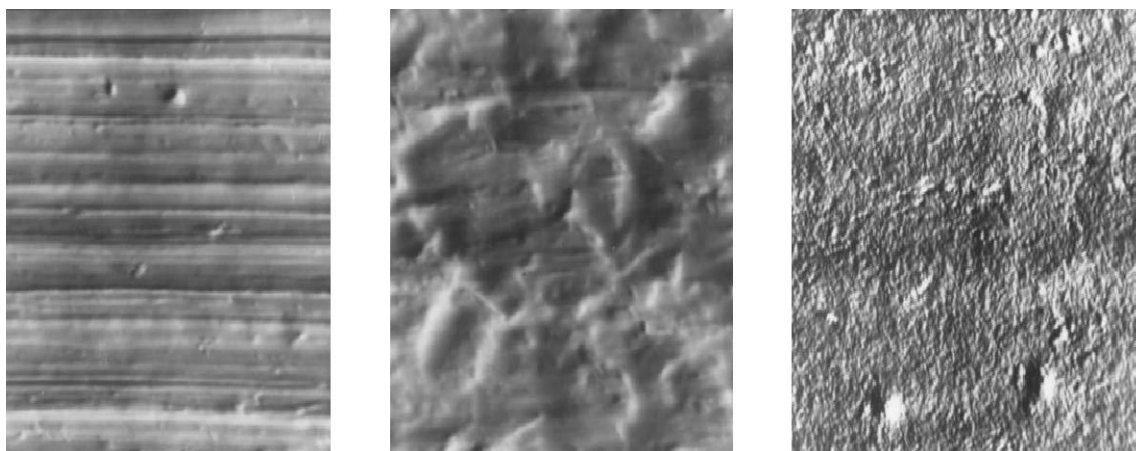
Podjela prema odnosu tvrdoća abraziva i trošene površine (slika 4.4):

- “Čista” abrazija – kada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće trošene podloge. Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine ako je abradirani materijal duktilan, ili lomljene strugotine ako je abradirani materijal krhak.
- Selektivna abrazija – kada u abradiranom materijalu postoji tvrđa faza od abraziva. Površina je izbrazdana s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze.
- “Nulta” abrazija – kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled. Čestice trošenja su sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja na površini (sloj prljavštine, oksida ili adsorbiranih plinova).



Slika 4.4. Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [13]

Na slici 4.5. su prikazani tipični primjeri trošenih površina. Lijeva slika predstavlja “čistu” abraziju, srednja slika predstavlja selektivnu abraziju, a desna slika predstavlja “nultu” abraziju.

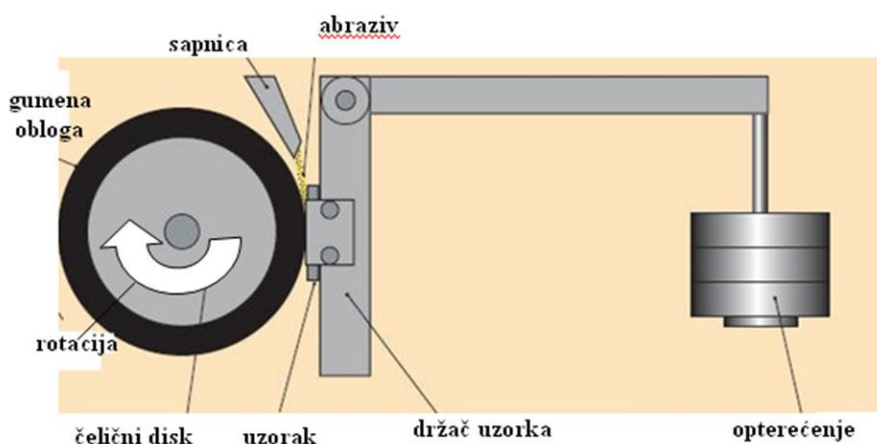


Slika 4.5. Tipični primjeri trošenih površina [13]

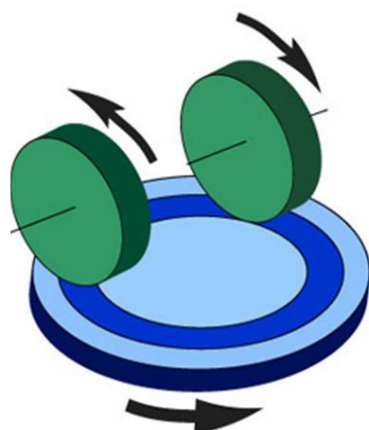
4.2. Ispitivanje otpornosti na abraziju

Općenito govoreći, ispitivanja triboloških karakteristika materijala možemo podijeliti na eksploatacijska, modelska i laboratorijska ispitivanja. Rezultati koje postizemo ovim ispitivanjima su uglavnom informacije o otpornosti trošenju (vijek trajanja), efikasnosti rada, potrošnji energenata i smanjenju neplaniranih zastoja (indirektne tribološke stavke). Laboratorijska ispitivanja abrazijskog trošenja su brz i relativno jeftin način dobivanja velike količine informacija o mehanizmima trošenja i njihovim veličinama. Tipični laboratorijski abrazijski testovi aproksimiraju slučajeve abrazijskog trošenja s dva i s tri tijela. Najčešće metode ispitivanja koje se primjenjuju su:

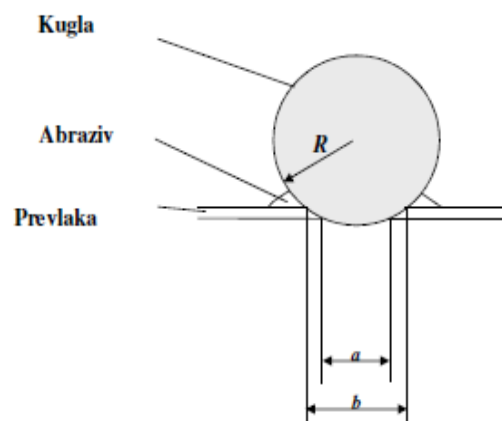
- metoda “suhi pijesak/gumeni kotač” (prema normi ASTM G 65-85) (slika 4.6)
- metoda taber abrazije (slika 4.7).
- metoda trošenja kuglicom (*ball cratering*) (slika 4.8)
- metoda sa slobodnom kuglicom (*free ball cratering system – calo test*) (slika 4.9)
- metoda s učvršćenom kuglom (*ball cratering*) (slika 4.10)



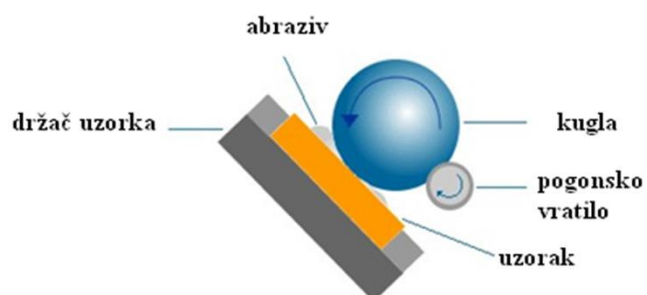
Slika 4.6. Metoda “suhi pijesak/gumeni kotač” [13]



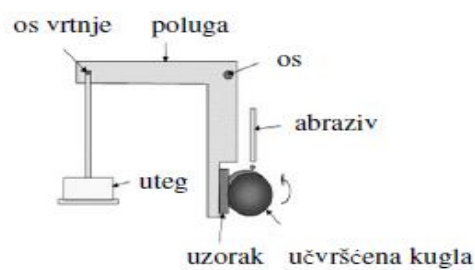
Slika 4.7. Metoda “Taber abrazije” [13]



Slika 4.8. *Metoda trošenja kuglicom* [13]



Slika 4.9. *Metoda sa slobodnom kuglicom* [13]



Slika 4.10. *Metoda s učvršćenom kuglom* [13]

Metodu taber abrazije karakterizira mjerenje broja okretaja koji je potreban za oštećivanje površinskog sloja. Nakon ispitivanja se dobiva taber indeks trošenja kao funkcija gubitka mase i broja okretaja.

Metoda trošenja kuglicom se također može koristiti za mjerenje debljine prevlaka, a osim toga ima još nekoliko prednosti:

- je relativno jeftina oprema,
- uzorci manjih dimenzija jer je malii trag trošenja ,
- postoji mogućnost premještanja opreme izvan laboratorija.

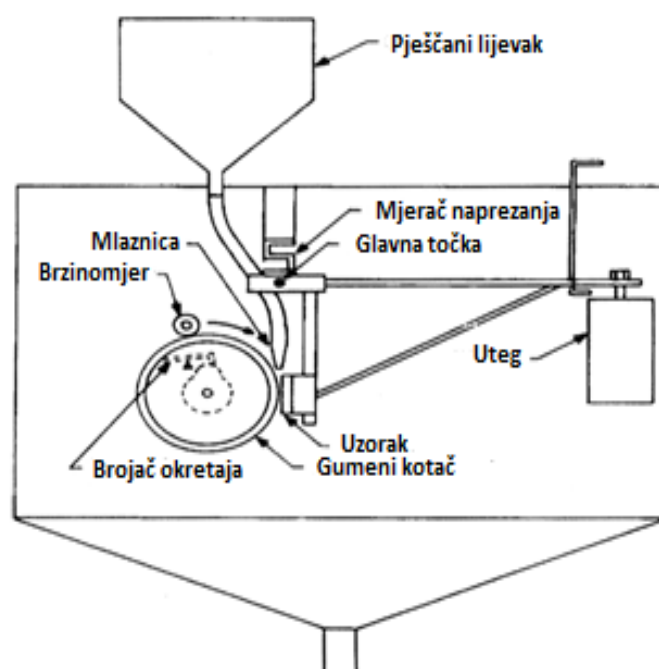
Metodom s učvršćenom kuglom je moguće mjeriti debljinu prevlake, promjer traga trošenja i koeficijent trošenja (funkcija broja okretaja kuglice, potrošenog volumena i opterećenja).

4.2.1. Metoda “suhi pijesak/gumeni kotač”

Metoda “suhi pijesak/gumeni kotač” simulira abrazijsko trošenje u slučaju tri tijela s malim napetostima. Ovakav tip trošenja se pojavljuje u rudarskoj industriji, npr. kod užadi koja je izložena sporom trošenju uzrokovanom klizanjem i kotrljanjem abrazijskih čestica poput kamenja i ruda zatočenih između metalnih površina. S obzirom da je taj tip trošenja vrlo spor, terenska ispitivanja bi sama po sebi bila prespora za procjenu novih materijala. Ova metoda je brza i daje relativno korelacijske informacije u usporedbi s terenskim ispitivanjima. Čak i prije nego li je metoda postala standardna u 1980. godini, mnogi laboratoriji su je svejedno koristili, a kad je postala standardna također je postala i najpopularnija metoda ispitivanja za rangiranje materijala prema otpornosti na abraziju. Shodno tome, mnoge kompanije su razvile kvalitativno razumijevanje o tome kako materijali funkcioniraju u određenim uvjetima trošenja u odnosu na druge materijale.

Standardni uređaj (slika 4.11) se sastoji od:

- čeličnog kotača s naplatkom gume promjera 228 mm X 12,77 mm,
- pješčanog lijevka povezanog preko cijevi s brizgalicom koja dopušta protok od 250- do 350-g/min,
- kočnice koja zaustavlja motor nakon određenog broja okretaja,
- poluge koja drži uzorak i stvara horizontalnu silu prema kotaču gdje protječe pijesak.



Slika 4.11. Shematski prikaz “suhi pijesak/gumeni kotač” uređaja [14]

Tipični uzorak za ispitivanje je pravokutnik, 25 x 75 mm, čija debljina iznosi od 3 do 13 mm. Površina trošenja je ravna s završnom obradom od barem 0,8 μm . Gustoća materijala koji se ispituje mora se znati kako bi se izračunao volumen materijala koji se istrošio prilikom ispitivanja.

Oprema ima dva ispitna parametra: klizna udaljenost (tj. broj okretaja kotača) i opterećenje uzorka. ASTM standard predviđa četiri procedure korištenja varijacija ova dva ispitna parametra, kao što je prikazano na tablici 4.1.

Tablica 4.1. Normirani uvjeti za metodu ispitivanja otpornosti na abraziju „suhi pijesak/gumeni kotač“ [13]

Varijanta postupka	Sila na uzorak, N	Broj okretaja kotača
A	130	6000
B	130	2000
C	130	100
D	45	6000

Ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ sastoji se od osam koraka:

1. čišćenje i vaganje uzoraka,
2. postavljanje uzorka na polužnu napravu i opterećenje polužne naprave,
3. propuštanje protoka pijeska kroz brizgalicu,
4. pokretanje kotača pogonjenog motorom,
5. otpuštanje poluge kako bi uzorak došao u kontakt s kotačem,
6. zaustavljanje motora (automatsko) i protoka pijeska,
7. uklanjanje uzorka,
8. čišćenje i ponovno vaganje uzorka kako bi se odredio gubitak mase tijekom ispitivanja.

Preko izgubljene mase i gustoće materijala računa se gubitak na volumenu. Cijeli postupak ispitivanja se ponavlja više puta. Koeficijent varijacije između dva ili više ispitivanja za materijal ne smije premašiti 7% kako bi se postigle ASTM specifikacije.

Za većinu materijala na bazi željeza ispitivanje se provodi na opterećenju iznosa od 130 N za oko 2000 okretaja kotača (ASTM B procedura) s gubitkom volumena koji seže od 20 do 120 mm³. Ponovljivost ispitivanja je najbolja za gubitke volumena koji iznose od 20 do 100 mm³. U ispitivanjima u kojima je izgubljeno manje od 20 mm³, svaka mala nehomogenost materijala je izuzetno uvećana i stoga bi trebalo primijeniti strože ispitivanje tako da se koristi ili veća klizna udaljenost ili veće opterećenje. Iznad 100 mm³ gubitka materijala žlijeb trošenja postaje predubok tako da može doći do kontakta s rubom gume kotača i uzrokovati nepravilne rezultate. Stoga bi u tom slučaju bilo prikladno koristiti blažu proceduru. Korištenje drugog postupka ima nedostatak da se rezultati ispitivanja ne mogu direktno uspoređivati s drugim ispitivanjima. Ova metoda bi se trebala koristiti samo za rangiranje različitih materijala, a ne za određivanje apsolutnih vrijednosti trošenja. Npr. materijal koji se troši barem upola kao i neki drugi materijal ispitan ovim testom neće trajati dvostruko duže na terenu jer ovo ispitivanje je sklono pretjerivanju u razlikama. Terenski faktori poput tvrdoće i veličine abrazivnih čestica će utjecati na apsolutnu vrijednost trošenja više od bilo kakvog rangiranja. Tipični rezultati trošenja su prikazani u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Uobičajene vrijednosti tvrdoće i gubitka volumena kod metode „suhi pijesak/gumeni kotač“ [14]

Legura	Tvrdoća (HB)	Volume loss (mm ³)	
		A	B
Nehrđajući čelik, tip 304	153	408.0	170.8
Niskolegirani čelik, ASTM A514	269	–	134.1
Niskolegirani čelik, AISI 4340	515	–	74.0
Alatni čelik, tip D2	608	45.3	14.6
Cr bijelo lijevano željezo	698	31.5	12.7
Ugljični čelik, AISI 1060	716	–	32.1

Općenito postoji razumljiva korelacija između tvrdoće i trošenja s obzirom na količinu istrošenog materijala koja se smanjuje kako se povećava tvrdoća materijala (tablica 4.3).

Nedostatak ove metode ispitivanja je u tome da se područje kontakta mijenja tokom procesa ispitivanja, odnosno kako se gubi određen dio volumena materijala, površina kontakta između gume i uzorka se povećava. Stoga, efektivno kontaktno područje se kontinuirano povećava tijekom ispitivanja. Ove okolnosti uzrokuju nemogućnost direktne usporedbe gubitka materijala između uzoraka, a pogotovo za one situacije gdje je gubitak volumena veći od 20 mm³.

EKSPERIMENTALNI DIO

5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA

5.1. Plan ispitivanja

Izrada ispitnih uzoraka, toplinska obrada i prevlačenje PACVD postupkom provedeni su na FSB-u u Laboratoriju za toplinsku obradu. Za ispitivanje otpornosti na abraziju pripremljene su tri skupine ispitnih uzoraka označene sljedećim brojevima::

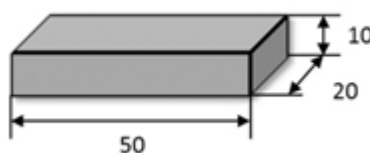
- 0 – neprevučeni uzorci.
- 2 – uzorci prevučeni TiN/TiCN prevlakom.
- 3 – uzorci prevučeni TiN/Ti-B-N prevlakom.

Osnovni materijali ispitnih uzoraka izabrani su iz skupine alatnih čelika za hladni rad:

- uzorci oznake C od suvremenog čelika Böhler **K390PM**
- uzorci oznake D od čelika Böhler **K110 (EN X153CrMoV12)**

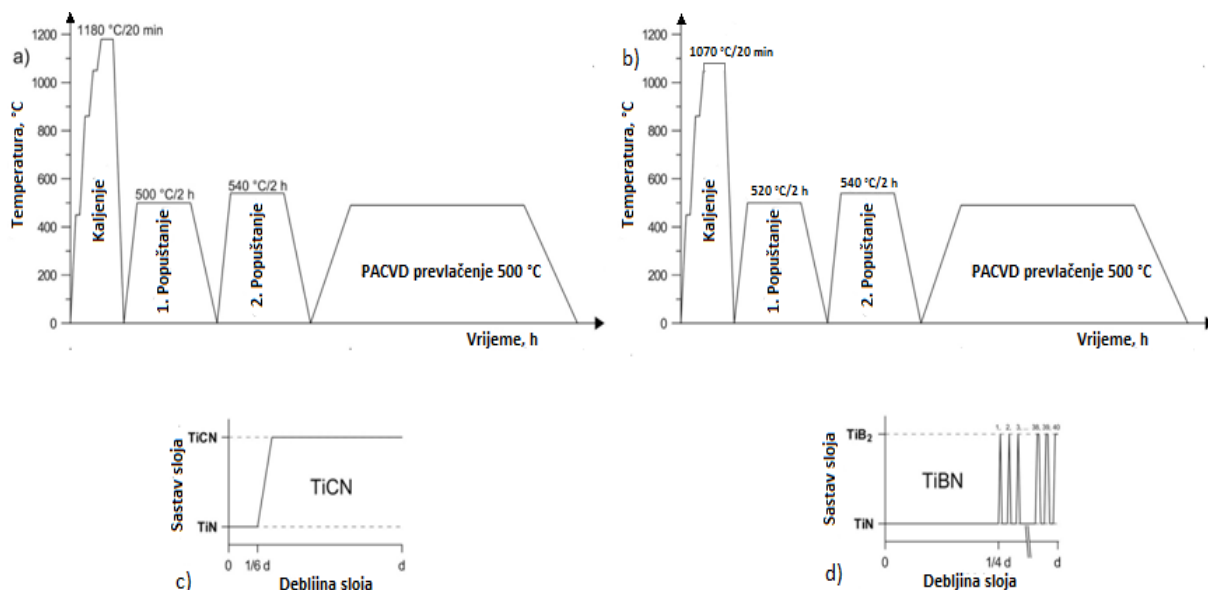
Cilj eksperimentalnih ispitivanja u radu je istraživanje i uspoređivanje otpornosti na abraziju TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N prevlaka primijenjenih na kaljenim i popuštenim K110 i K390 alatnim čelicima za hladni rad.

Ispitni uzorci su izrađeni u obliku kvadra dimenzija (slika 5.1.), a njihova površina je prije prevlačenja mehanički očišćena finim brušenjem i poliranjem kako bi se postigla površinska hrapavost $R_a = 0.133 \pm 0.012 \mu m$. Uzorci su također očišćeni postupkom ionskog bombardiranja prije PACVD prevlačenja u trajanju od 2 sata.



Slika 5.1. Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka za ispitivanje otpornosti na abraziju [15]

Ispitni uzorci su nakon čišćenja prevučeni tankom TiN prevlakom koja predstavlja vezivi sloj između podloge i prevlake TiCN (za uzorke oznaka C2 i D2) odnosno višeslojne prevlake TiN/Ti-B-N (za uzorke oznaka C3 i D3). Višeslojna TiN/Ti-B-N prevlaka se sastoji od 42 sloja Ti-B-N i zadnjeg TiB₂ sloja. PACVD prevlačenje je izvršeno pomoću plazme aktivirane pulsirajućom istosmjernom strujom u Rübig GmbH type PC 70/90 industrijskoj vakuumskoj peći. Parametri PACVD prevlačenja su izabrani prema preporukama proizvođača PACVD sustava i prijašnjih istraživanja (slika 5.2).



Slika 5.2. Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od K110 i K390 Čelika:
 a) dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K390 čelika,
 b) dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K110 čelika,
 c) PACVD proces prevlačenja za nastanak duplex TiN/TiCN prevlake,
 d) PACVD proces prevlačenja za nastanak višeslojne TiN/Ti-B-N prevlake [15]

Proces nastajanja sloja kod C2 i D2 uzoraka je sljedeći:

1. Nastanak TiN sloja čija debljina iznosi 1/6 debljine cjelokupne prevlake (trajanje 1h i 30 min),
2. Promjena protoka plinova i nastanak prijelaznog sloja iz TiN u TiCN (trajanje 30 min),
3. Nastanak TiCN sloja (trajanje 6h).

Proces nastajanja sloja kod C3 i D3 uzoraka je sljedeći:

1. Nastanak TiN sloja čija debljina iznosi 1/4 debljine cjelokupne prevlake (trajanje 1h i 30 min),
2. Izmjenično slaganje TiN i Ti-B-N slojeva dok ne nastane 84. sloj (trajanje 7h i 15 min),
3. Nanošenje rubnog TiB₂ sloja.

5.2. Provedba ispitivanja

Ispitivanje je provedeno kroz određen broj koraka koji je rezultirao dobivanjem informacija o gubitku mase ispitnih uzoraka. Cjelokupna procedura je vremenski vrlo zahtjevna i iziskuje veliku pozornost. Ispitivanje je teklo sljedećim redoslijedom:

1. Čišćenje uzorka u ultrazvučnoj kupci,
2. Postavljanje uzorka u stroj za ispitivanje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“
3. Trošenje uzorka,
4. Vađenje uzorka i ponovno čišćenje u ultrazvučnoj kupci,
5. Sušenje uzorka,
6. Vaganje uzorka na mjernom uređaju,
7. Računanje promjene mase.

Čišćenje uzorka je postupak koji se mora provesti minimalno 2 puta. Glavni razlog čišćenja je odstranjivanje čestica pijeska koji su nakon ispitivanja ostali na površini, a također i odstranjivanje čestica prljavštine na površini koje su se pojavile zbog dodira prsta, odlaganja na prljavu podlogu ili zbog boravljenja uzorka u prljavoj (prašnjavao) atmosferi. Postupak čišćenja se vršio pomoću ultrazvučne kupke koja je prikazana na slici 5.3.



Slika 5.3. *Ultrazvučna kupka*

Postupak čišćenja uzorka u ultrazvučnoj kupki je sljedeća:

1. Punjenje prazne čaše alkoholom do mjere kod koje je čitav uzorak uronjen,
2. Otvaranje kupke i punjenje vodom,
3. Postavljanje čaše s uzorkom i alkoholom u kupku,
4. Podešavanje vremena čišćenja (180 sekundi),
5. Pažljivo odstranjivanje uzorka iz čaše te sušenje.

Nakon čišćenja i sušenja, uzorak je spreman za podvrgavanje abrazijskom trošenju. Ispitivanje je izvršeno na uređaju za ispitivanje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ koji je prikazan na slici 5.4.



Slika 5.4. Uređaj za ispitivanje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ [13]



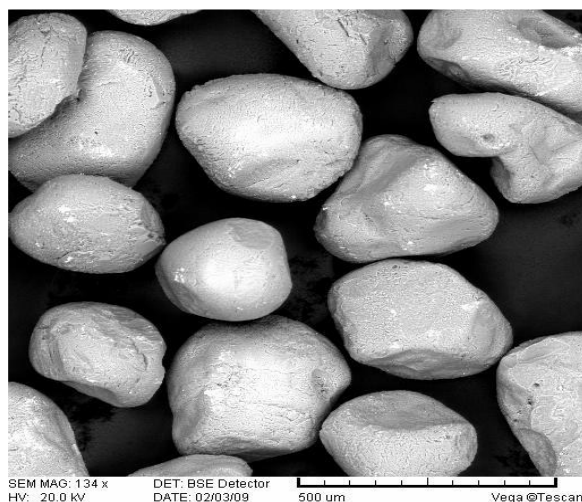
Slika 5.5. Detalj uređaja: kotač, gumena traka, mlaznica, pijesak, držač uzorka [13]

Postupak ispitivanja uzorka metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ sastoji se od sljedećih koraka:

1. Podešavanje brojača okretaja na nulu,
2. Postavljanje i pritezanje uzorka na držaču uzorka,
3. Ulijevanje pijeska u lijevak,
4. Uključivanje stroja i početak vrtnje kotača,
5. Istovremeno povlačenje poluge i zatvaranje uređaja,
6. Pažljivo promatranje trošenja dok se ne izvrši željeni broj okretaja kotača,
7. Isključivanje stroja i zatvaranje protoka pijeska,
8. Povratak poluge na prijašnji položaj, otvaranje uređaja i vađenje uzorka.

Pri provedbi ispitivanja nastaje prašina sastavljena od pijeska i čestica trošenja što zahtjeva pozornost pri rukovanju uzorkom. Ispitivanje je provedeno s abrazivskim trošenjem uzorka tijekom 500 okretaja kotača, odnos s putem trošenja od 358 m. Tijekom ovog puta trošenja nastaje značajno različito trošenje prevučenih i neprevučenih uzoraka, s gubitkom mase koji se može puzdano i točno izmjeriti. Tih 500 okretaja je podijeljeno na 5 dijelova, odnosno na 10 ispitivanja svakog pojedinog uzorka. Npr. uzorak C2 je podvrgnut trošenju uz 100 okretaja kotača te je nakon toga očišćen i izmjeren mu je gubitak mase. Nakon toga je uzorak još 9 puta podvrgnut istom procesu. Nakon 500 okretaja gumenog kotača trošenjem je probijena prevlaka na svim ispitanim uzorcima i počelo je trošenje podloge.

Negativan aspekt ovog ispitivanja je brza konzumacija pijeska za ispitivanje. Uobičajeno se koristi zaobljeni kvarcni pijesak koji je prikazan na slici 5.6. S obzirom da čestice trošenja nisu prevelike i ne prave veliku razliku, pijesak je moguće ponovno koristiti nakon određenog broja ciklusa ispitivanja. Pijesak je također potrebno čuvati u zatvorenoj posudi ili vreći kako ne bi došao u kontakt s vlagom i prilikom ispitivanja uzrokovao zastoj protoka u mlaznici.



Slika 5.6. Zaobljeni kvarcni pijesak [13]

Nakon namjernog trošenja, uzorak se ponovno podvrgava procesu čišćenja u ultrazvučnoj kupki i sušenja, a nakon toga se šalje na vagu za mjerenje koja je prikazana na slici 5.7.



Slika 5.7. Vaga "Mettler" Zurich (Laboratorij za tribologiju FSB-a)

Mjerenje se vrši kroz sljedećih par koraka:

1. Otvaranje komore i postavljanje uzorka na vagu,
2. Zatvaranje komore i spuštanje poluge,
3. Podešavanje pretpostavljene težine i višestruko ponavljanje dok se ne pogodi točna masa,
4. Uspoređivanje s prethodnim rezultatima i utvrđivanje gubitka mase.

Ako su rezultati zadovoljavajući onda se uzorak ponovno čisti u ultrazvučnoj kupki te se cijeli postupak ponavlja istim redoslijedom. Jedan ciklus mjerenja, čišćenja i trošenja (100 okretaja kotača) traje oko 15 – 20 minuta.

6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA

6.1. Ispitivanje otpornosti na abraziju

Cjelokupna provedba ispitivanja prema poglavlju 5.2. je u konačnici rezultirala informacijama o gubicima mase pojedinih uzoraka čime se otvorila mogućnost za usporedbu otpornosti na abraziju kako osnovnih materijala, tako i prevlaka.

Praćen je gubitak mase kroz svih 10 ispitivanja za svaki pojedini uzorak te su izračunate srednje i ukupne vrijednosti gubitka mase. Usporedba gubitaka mase trošenih uzoraka provedena je prema jednadžbama (1), odnosno (2).

$$\Delta m_0 = \Delta m_{osnovni}$$

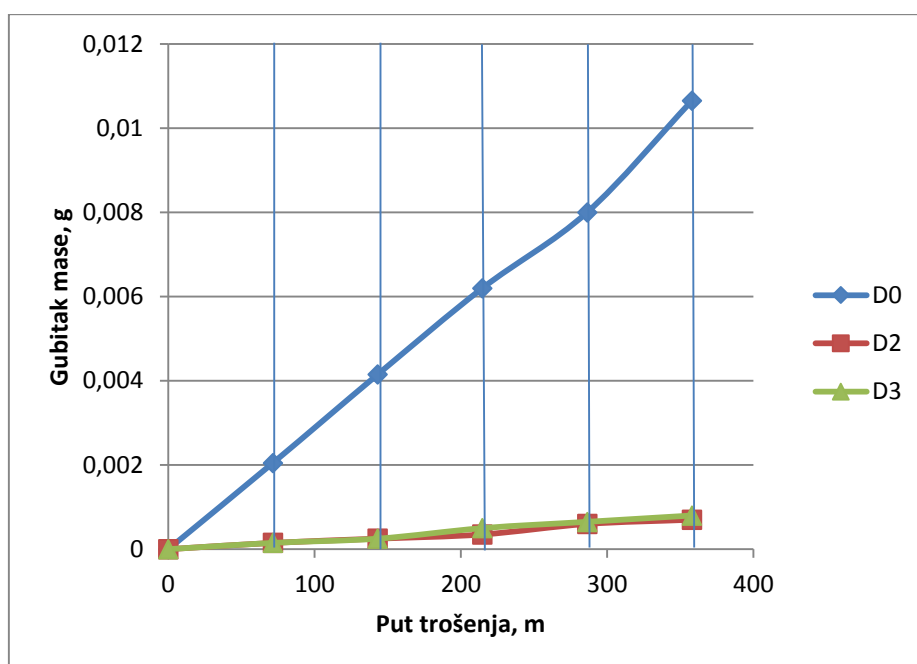
$$\Delta m_2 = \Delta m_{TiN/TiCN}$$

$$\Delta m_3 = \Delta m_{TiN/Ti-B-N}$$

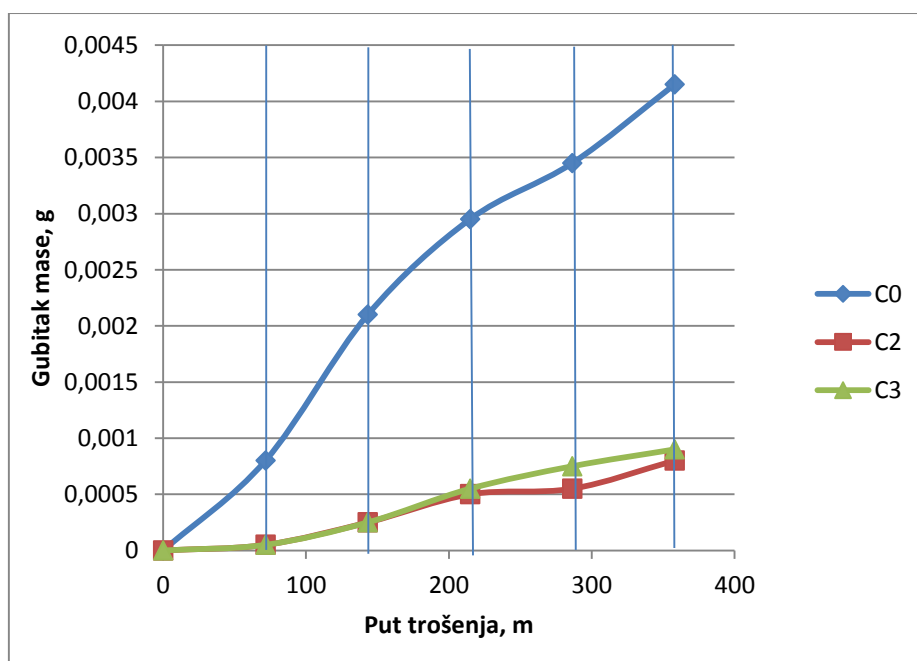
$$\Delta m_{rel} = \left(\frac{\Delta m_0 - \Delta m_2}{\Delta m_2} \right) * 100 \% \quad (1)$$

$$\Delta m_{rel} = \left(\frac{\Delta m_0 - \Delta m_3}{\Delta m_3} \right) * 100\% \quad (2)$$

Na slikama 6.1. i 6.2. se mogu vidjeti iznosi gubitaka mase na određenim iznosima puta trošenja za sve skupine ispitnih uzoraka izrađenih od K110 i K390 čelika.

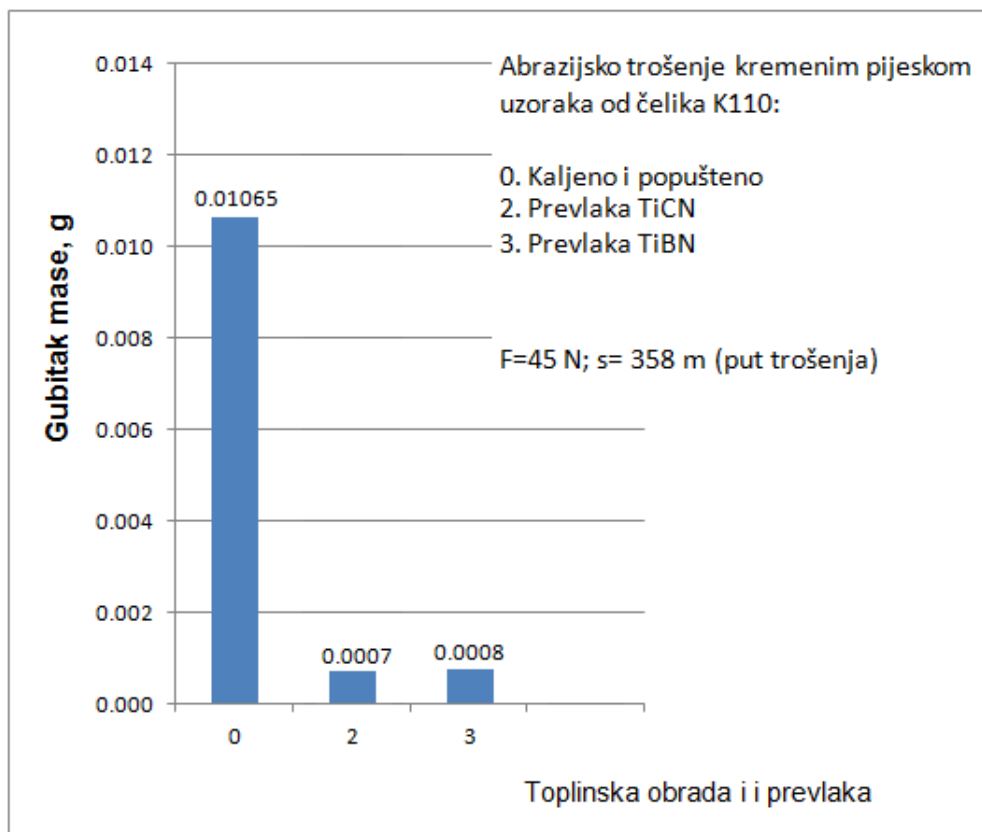


Slika 6.1. Gubitak mase u odnosu na put trošenja za ispitne uzorke iz skupine K110 čelika



Slika 6.2. Gubitak mase u odnosu na put trošenja za ispitne uzorke iz skupine K390 čelika

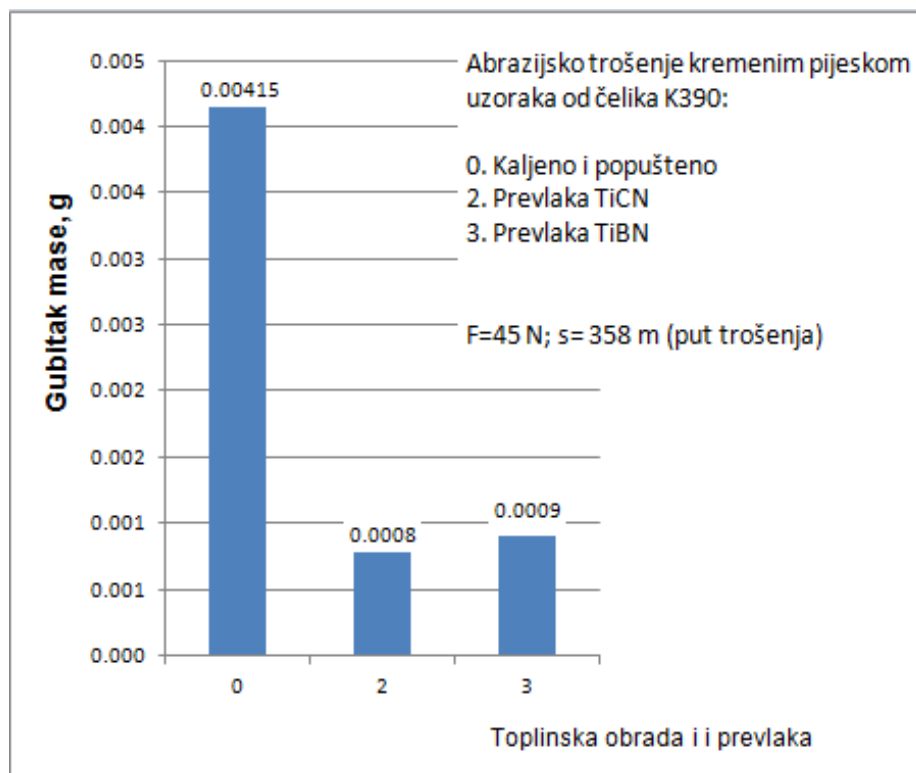
Slike 6.3. i 6.4. argumentiraju izvrsnu otpornost prevlaka na abraziju. Iz slika se može primijetiti, a također i korištenjem jednadžbi (1) i (2), kako je otpornost na abraziju uzoraka od čelika K110 i uzoraka od čelika K390 prevučenih slojem TiN/TiCN (D2), odnosno slojem TiN/Ti-B-N (D3) do nekoliko puta veća od neprevučenog uzorka.



Slika 6.3. Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine D

Iz rezultata ispitivanja trošenja čelika K110 nakon 500 okretaja kotača prikazanih na slikama 6.1 i 6.3 može se zaključiti sljedeće:

- Neprevučeni uzorci (D0) čelika K110 tijekom cijelog ispitivanja pokazuju značajno veći gubitak mase od prevučenih uzoraka.
- Gubitak mase ispitnog uzorka prevučenog slojem TiN/TiCN je 14 puta manji od gubitka mase neprevučenih uzoraka.
- Gubitak mase ispitnog uzorka prevučenog slojem TiN/Ti-B-N je 12 puta manji od gubitka mase neprevučenih uzoraka.



Slika 6.4. Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine C

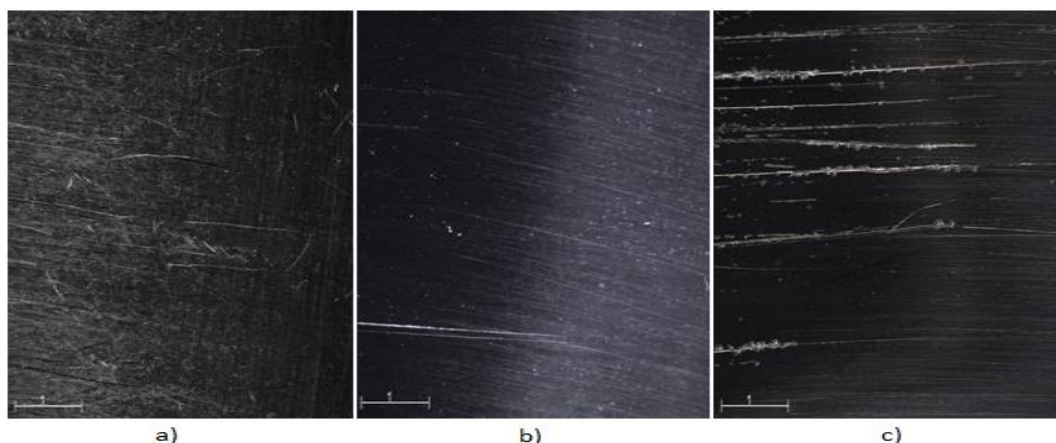
Iz rezultata ispitivanja trošenja čelika K390 nakon 500 okretaja kotača prikazanih na slikama 6.2 i 6.4 može se zaključiti sljedeće:

- Nprevučeni uzorci (C0) čelika K390MC tijekom cijelog ispitivanja pokazuju značajno veći gubitak mase od prevučenih uzoraka.
- Nprevučeni ispitni uzorci čelika K390MC pokazali su 1,6 puta manji gubitka mase u odnosu na nprevučene ispitne uzorke čelika K110.
- Gubitak mase ispitnog uzorka prevučenog slojem TiN/TiCN je 4 puta manji od gubitka mase nprevučenih uzoraka.
- Gubitak mase ispitnog uzorka prevučenog slojem TiN/Ti-B-N je 3,6 puta manji od gubitka mase nprevučenih uzoraka.

Usporedbom gubitka mase prevlaka TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N na obje podloge (K100 i K390MC) uočavaju se iste vrijednosti, odnosno može se zaključiti da su obje podloge prikladne za nanošenje ovih prevlaka.

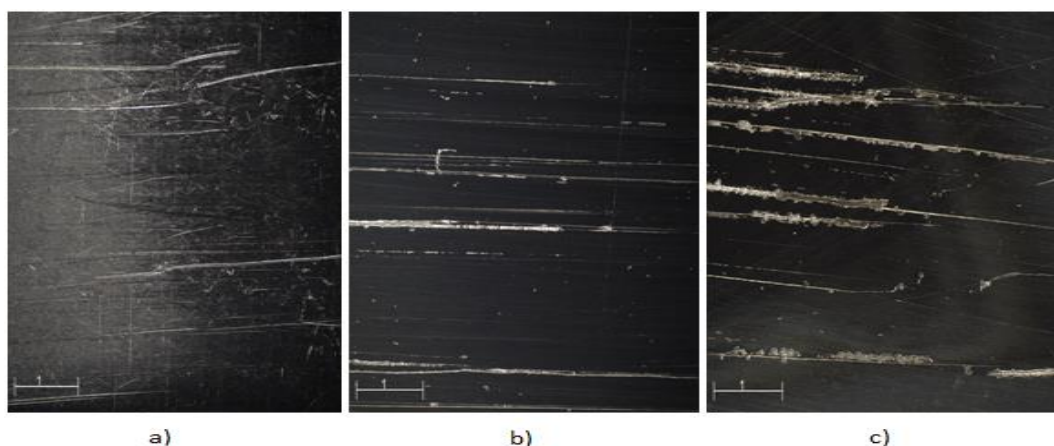
6.2. Analiza trošenih površina

Izgled trošenih površina na slikama 6.3. i 6.4. također potvrđuje razliku u gubitku mase i ukazuje na razlike između TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N prevlaka. Na slici 6.4.a) se može primijetiti uobičajeni izgled neprevučene površine s uniformiranim abrazijskim trošenjem koje je uzrokovano česticama pijeska. Slika 6.4.b) prikazuje abrazijsko trošenje Ti/TiCN prevlake s dubokim i odvojenim brazdama. Oko pukotina i brazda se mogu primijetiti plastične deformacije prevlake. Na slici 6.4.c) se može primijetiti delaminacija prevlake oko brazdi s većim gubitkom mase u odnosu na TiN/TiCN prevlaku.



Slika 6.5. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika K110:

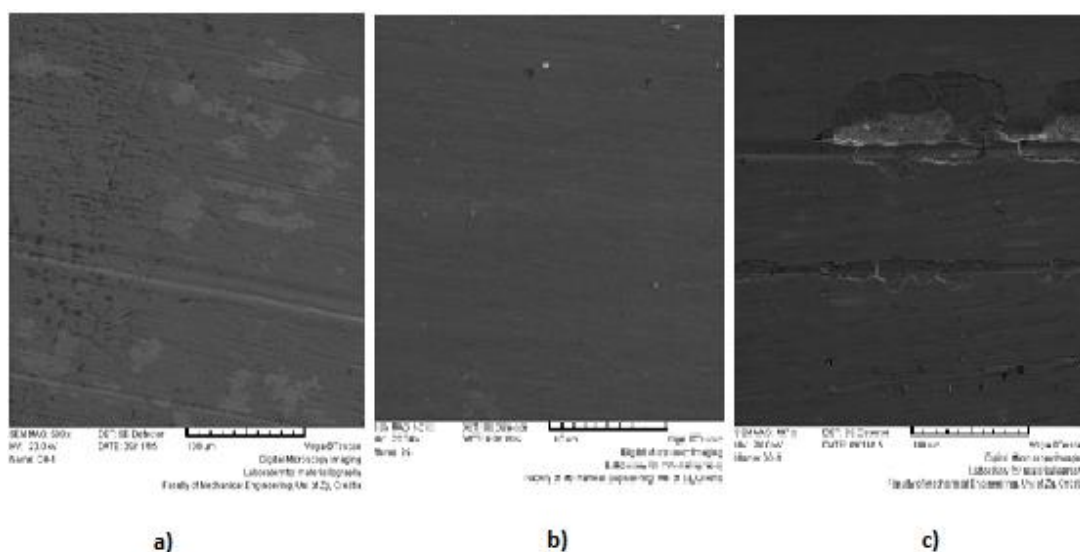
- a) Nprevučeni uzorak (D0)
- b) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (D2)
- c) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (D3)



Slika 6.6. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika K390MC:

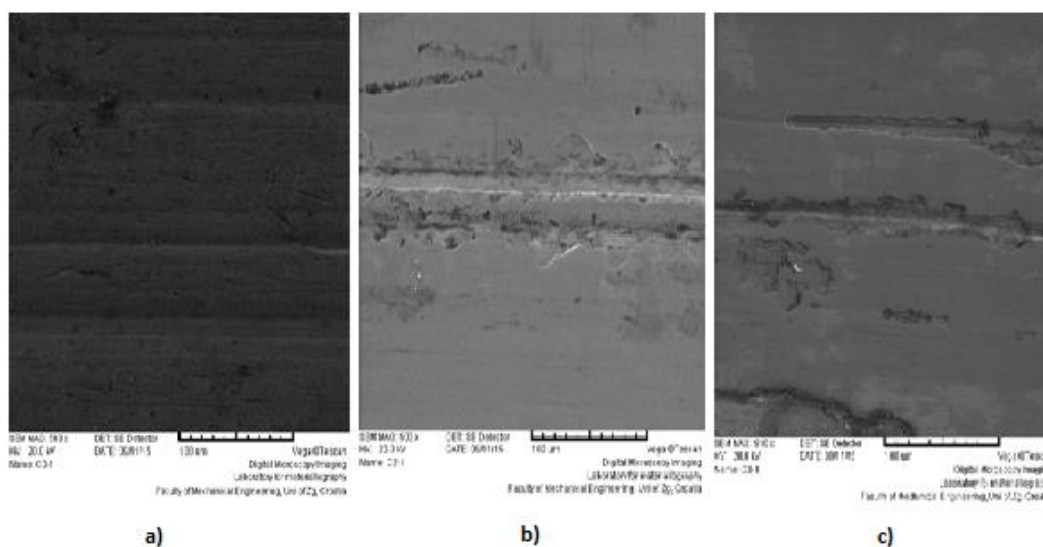
- a) Nprevučeni uzorak (C0)
- b) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (C2)
- c) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (C3)

Na slikama 6.7. c) i 6.8. c) se još jasnije može vidjeti izražena karakteristična delaminacija površine C3 i D3 ispitnih uzoraka. Na slici 6.8. b) se također može vidjeti trag trošenja uzrokovan abrazijom sitnih čestica pijeska.



Slika 6.5. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika K110:

- a) Nprevučeni uzorak (D0)
- b) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (D2)
- c) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (D3)



Slika 6.8. SEM slike trošenih površina ispitnih uzoraka izrađenih od K390 čelika:

- a) Nprevučeni uzorak (C0)
- b) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/TiCN (C2)
- c) Uzorak prevučen slojem PACVD TiN/Ti-B-N (C3)

7. ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak PACVD i mogućnosti povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje alatnih čelika za hladni rad primjenom višeslojnih prevlaka TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N. Kao podloga za PACVD prevlake primijenjeni su visokolegirani alatni čelici za hladni rad X155CrVMo12-1 (Böhler K110) Böhler K390 MC. Otpornost na abrazijsko trošenje ispitana je metodom „pijesak-gumeni kotač“. Iz rezultata ispitivanja zaključuje se slijedeće:

- Neprevučeni uzorci suvremenog čelika K390MC proizvodnog metalurgijom praška pokazali su 1,6 puta manji gubitak mase u odnosu na neprevučene ispitne uzorke od konvencionalno proizvedenog čelika K110.
- Primjena višeslojnih prevlaka TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N na obje podloge (K100 i K390MC) pokazala je slične gubitke mase, odnosno čini se da su obje podloge podjednako prikladne za nanošenje ovih prevlaka.
- Primjena prevlaka TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N na čeliku K110 značajno je smanjila gubit mase za 13 do 14 puta u odnosu na neprevučene ispitne uzorke. Kod suvremenog čelika K390MC ovo smanjenje je manje (za oko 3,6 do 4 puta) jer se ovaj čelik i u neprevučenom stanju troši manje nego čelik K110.
- TiN/TiCN prevlaka je pokazala malo bolju duktilnost i manji stupanj delaminacije kod abrazijskog trošenja u usporedbi s višeslojnom TiN/Ti-B-N prevlakom.

Otpornost ispitanih PACVD prevlaka TiN/TiCN i TiN/Ti-B-N je konkurentna sličnim PVD prevlakama. No postupak PACVD pokazuje niz prednosti u odnosu na PVD postupak, posebno kod alata složene geometrije što ga čini prikladnim za suvremenu proizvodnju i primjenu.

Nastavak provedenih ispitivanja bi trebalo usmjeriti na traženje optimalne kombinacije parametara PACVD postupka koji bi povećali adhezivnost i otpornost na trošenje prevlaka u određenim eksploatacijskim uvjetima.

LITERATURA

- [1] Filetin T., Grilec K., Postupci modificiranja i prevlačenja površina, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [2] D. Krumes, Toplinska obradba, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [3] K. L. Choy, Chemical vapour deposition of coatings, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 2001.
- [4] S. S. Eskildsen, C. Mathiasen, M. Foss, Plasma CVD: process capabilities and economic aspects, Danish Technological Institute, Aarhus, 1999.
- [5] F. Cajner, I. Kumić, S. Kovačić, M. Cingesar, Publikacija ARISE projekta, FSB, Zagreb, 2014.
- [6] <http://www.precisionfab.net/tutorials02.aspx>
- [7] M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes, Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [8] ... "BÖHLER K110"
- [9] F. Cajner, B. Matijević, Predavanja i vježbe iz kolegija „*Toplinska obrada*“, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [10] B. Matijević, Predavanja i vježbe iz kolegija "*Napredne tehnologije materijala*", autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [11] F. Cajner, D. Landek, Predavanja i vježbe iz kolegija "*Posebni metalni materijali*", autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [12] ... "BÖHLER K390 MC"
- [13] F. Cajner, B. Matijević, K. Grilec, S. Jakovljević: Predavanja i vježbe iz kolegija "*Tribologija i inženjerstvo površina*", autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [14] J.A. Hawk, R.D. Wilson, J.H. Tylczak, O.N. Dogan, Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation, US Department of Energy, Albany Research Center, Albany, 1999.
- [15] F. Cajner, D. Landek, H. Rafael, J. Jačan, D. Bogdanić: Wear resistance of TiN/TiCN and TiN/Ti-B-N multilayer coatings fabricated by the pulsed DC PACVD process on K390 MC cold work tool steel, Proceeding of the EU Conference on Heat Treatment and 22nd IFHTSE Congress, 20-22. 05. 2015., Venice, Italy.

PRILOZI

Prilog 1.1: Rezultati ispitivanja otpornosti na abraziju ispitnih uzoraka izrađenih od K110 čelika

Oznaka čelika							K110
Oznaka uzorka	Masa i gubitak mase uzorka						
		0	100	200	300	400	500
D0	m, g	75,2435	75,2413	75,2391	75,2361	73,2328	75,2299
		75,2299	75,228	75,226	75,2249	75,2246	75,2222
	m _{sr} , g	75,2367	75,23465	75,23255	75,2305	75,2287	75,22605
	$\Delta m_{sr,1}$, g	0	0,00205	0,0021	0,00205	0,0018	0,00265
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,00205	0,00415	0,0062	0,008	0,01065
D2	m, g	74,4787	74,4786	74,4785	74,4784	74,4783	74,4782
		74,4782	74,478	74,4779	74,4778	74,4774	74,4773
	m _{sr} , g	74,47845	74,4783	74,4782	74,4781	74,47785	74,47775
	$\Delta m_{sr,2}$, g	0	0,00015	0,0001	0,0001	0,00025	0,0001
	$\Delta m_{cum,2}$, g	0	0,00015	0,00025	0,00035	0,0006	0,0007
D3	m, g	74,5144	74,5142	74,5141	74,514	74,5139	74,5137
		74,5137	74,5136	74,5135	74,5131	74,5129	74,5128
	m _{sr} , g	74,51405	74,5139	74,5138	74,51355	74,5134	74,51325
	$\Delta m_{sr,3}$, g	0	0,00015	0,0001	0,00025	0,00015	0,00015
	$\Delta m_{cum,3}$, g	0	0,00015	0,00025	0,0005	0,00065	0,0008

Prilog 1.2: Kumulativni gubitak mase za ispitne uzorke izrađene od K110 čelika

	0	2	3		
Broj okretaja	D0	D2	D3	Put trošenja, m	
0	0	0	0	0	
100	0,00205	0,00015	0,00015	71,592	
200	0,00415	0,00025	0,00025	143,184	
300	0,0062	0,00035	0,0005	214,776	
400	0,008	0,0006	0,00065	286,368	
500	0,01065	0,0007	0,0008	357,96	
	Kaljeno i popušteno	TiCN	TiBN		

Prilog 2.1: Rezultati ispitivanja otpornosti na abraziju ispitnih uzoraka izrađenih od K390 čelika

Oznaka čelika							K390
Oznaka uzorka	Masa i gubitak mase uzorka						
		0	100	200	300	400	500
C0	m, g	70,9772	70,9766	70,9748	70,9734	70,9728	70,9722
		70,9722	70,9712	70,9704	70,9701	70,9697	70,9689
	m _{sr} , g	70,9747	70,9739	70,9726	70,97175	70,97125	70,97055
	Δm _{sr,1} , g	0	0,0008	0,0013	0,00085	0,0005	0,0007
	Δm _{cum,1} , g	0	0,0008	0,0021	0,00295	0,00345	0,00415
C2	m, g	71,0298	71,0298	71,0297	71,0296	71,0296	71,0293
		71,0293	71,0292	71,0289	71,0285	71,0284	71,0282
	m _{sr} , g	71,02955	71,0295	71,0293	71,02905	71,029	71,02875
	Δm _{sr,2} , g	0	0,00001	0,0002	0,00025	0,00001	0,00025
	Δm _{cum,2} , g	0	0,00001	0,00025	0,0005	0,00055	0,0008
C3	m, g	71,1336	71,1335	71,1335	71,1334	71,1331	71,1329
		71,1329	71,1329	71,1325	71,132	71,1319	71,1318
	m _{sr} , g	71,13325	71,1332	71,133	71,1327	71,1325	71,13235
	Δm _{sr,3} , g	0	0,00001	0,0002	0,0003	0,0002	0,00015
	Δm _{cum,3} , g	0	0,00001	0,00025	0,00055	0,00075	0,0009

Prilog 2.2: Kumulativni gubitak mase za ispitne uzorke izrađene od K390 čelika

	0	2	3		
Broj okretaja	C0	C2	C3	Put trošenja, m	
0	0	0	0	0	
100	0,0008	0,00001	0,00001	71,592	
200	0,0021	0,00025	0,00025	143,184	
300	0,00295	0,0005	0,00055	214,776	
400	0,00345	0,00055	0,00075	286,368	
500	0,00415	0,0008	0,0009	357,96	
	Kaljeno i popušteno	TiCN	TiBN		